The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	製品システムデザインにおける一貫した設計プロセスのためのモデリング手法に関する研究
Author(s)	河村, 憲
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69581
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

製品システムデザインにおける
一貫した設計プロセスのための
モデリング手法に関する研究

河村　憲

2018 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

概要

近年、製品システムは複雑化の一途をたどり、その設計においては、製品システム全体の把握や最適設計の難化、手戻りなどの問題が生じている。このような問題を解決するため、製品システム全体を俯瞰的にモデリングし、要求を満たすように適正に設計を行うモデルベースのシステムデザインが益々重要となっている。

しかし、従来のモデリング手法では、概念設計、基本設計、および各詳細設計へと繋がるシステムデザインのプロセスにおいて、どのような情報をどのような観点で捉えどのように表現するかといった、一貫したモデリング概念およびモデル記述方法が構築されていないという課題がある。特に、形状や配置といった実体情報がモデリングされておらず、ハードウェアの詳細設計に繋げることができないという課題がある。そこで本研究では、概念設計、基本設計から詳細設計へと一貫して繋がる、モデルベースでのシステムデザインを可能とするモデリング手法の構築を目的とした。

その結果、システムデザインはマルチドメインに関する設計であるという点に着目し、単一設計ドメインからマルチドメインに展開、システム的な観点で整理することで、モデリングに必要な情報を抽出、整理した。すなわち、製品システムに関する情報、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報、各設計ツールに関する情報という 4 つの観点とそれらの関係で情報を捉えるモデリング概念を構築した。構築したモデリング概念を基に、製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの 4 つのモデルを SysML を拡張して記述し、それらを紐づけることで、一貫してモデルベースのシステムデザインが可能なモデル記述方法を構築した。さらに、パラメトリックに形状、配置を扱える CAD(Geant4)を用いて、システムレベルでの実体情報のモデリングを可能とした。構築したモデリング手法を放射線計測システムのシステムデザインに適用した結果、一貫したモデリングが可能であり、要求から繋がる実体情報のモデリングが可能であった。

以上、本研究では、製品システムデザインにおける、概念設計、基本設計、および詳細設計へと繋がる一貫した設計プロセスのための、モデリング概念とモデル記述方法を合わせたモデリング手法を構築できた。また、放射線計測システムのシステムデザインにおけるモデリングと応用展開を行うことができた。これらの知見は、今後より複雑化していく製品システムのシステムデザインを支援でき、社会を豊かにするより良いものづくりに寄与できるものである。

目次　　頁

第1章　緒言　1
1.1　背景　1
1.2　現状　3
1.3　課題　6
1.4　本研究の目的と本論文の構成　7

第2章　システムデザインにおけるモデリング概念の構築　13
2.1　緒言　13
2.2　新しいモデリング概念の提案　13
2.3　提案したモデリング概念と現状のシステムデザイン手法で扱う情報との比較　19
2.3.1　SDSI-Cubic(System Design System Integration-Cubic)手法で扱う情報との比較　19
2.3.2　SLIM(System Lifecycle Management)手法で扱う情報との比較　22
2.3.3　PDI(Product Data Integration)手法で扱う情報との比較　24
2.4　新しいモデリング概念の構築結果と考察　27
2.5　結言　30

第3章　モデル記述方法の構築と実装　32
3.1　緒言　32
3.2　モデル記述方法の現状と課題　32
3.3　SysML を用いたモデル記述方法の構築と実装　43
3.3.1　実装に向けたモデル記述方法の全体像の構築　43
3.3.2　製品システムモデルの記述方法の構築　49
3.3.2.1　製品システムに関する要求の定義　49
3.3.2.2　製品システムに関する機能、振る舞いの定義　51
3.3.2.3　理想システム構成の定義　52

3.3.2.4　理想システム構成に関する制約関係の定義　53
3.3.3　設計空間固有モデルの記述方法の構築　56
3.3.3.1　設計空間に関する要求の定義　57
3.3.3.2　設計空間に関する具体的なシステム構造の定義　58
3.3.3.3　具体的なシステム構造に関する制約関係の定義　59
3.3.3.4　最適化問題の定義　60
3.3.4　ツール連携アルゴリズム固有モデルの記述方法の構築　65
3.3.4.1　設計ツールの構成の定義　65
3.3.4.2　設計ツールを連携するフローの定義　66
3.3.5　設計ツール固有モデルの記述方法の構築　68
3.3.5.1　CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義　69
3.3.5.2　CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義　79
3.4　モデル記述方法の構築結果と考察　81
3.5　結言　82

第4章　放射線計測システムのシステムデザインへの本モデリング手法の適用結果　86
4.1　緒言　86
4.2　放射線計測システムの背景と本手法の適用理由　86
4.3　放射線計測システムのシステムデザインにおけるモデリング結果　88
4.3.1　企画(要求仕様)の概要　88
4.3.2　製品システムモデルのモデリング結果と考察　91
4.3.2.1　放射線計測システムに関する要求の定義とモデル記述　91
4.3.2.2　放射線計測システムに関する機能、振る舞いの定義とモデル記述　100
4.3.2.3　放射線計測システムの理想システム構成の定義とモデル記述　102
4.3.2.4　理想システム構成に関する制約関係の定義とモデル記述　111

4.3.3　設計空間固有モデルのモデリング結果　117
4.3.3.1　設計空間に関する要求の定義とモデル記述　117
4.3.3.2　設計空間に関する放射線計測システムの具体的なシステム構造の定義とモデル記述　118
4.3.3.3　具体的なシステム構造に関する制約関係の定義とモデル記述　119
4.3.3.4　最適化問題の定義とモデル記述　122
4.3.4　ツール連携アルゴリズム固有モデルのモデリング結果　122
4.3.4.1　設計ツールの構成の定義とモデル記述　122
4.3.4.2　設計ツールを連携するフローの定義とモデル記述　124
4.3.5　設計ツール固有モデルのモデリング結果　124
4.3.5.1　CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義とモデル記述　124
4.3.5.2　CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義とモデル記述　130
4.4　応用展開の結果と考察　133
4.4.1　SDSI-Cubic フレームワークを用いた最適化設計の実行結果と考察　133
4.4.2　最適化問題変更におけるモデル再利用性の検証結果と考察　140
4.4.3　詳細設計(G(E)関数導出)の結果と考察　144
4.5　考察　150
4.6　結言　151

第5章　結言　155

謝辞　158

付録 A　放射線計測システムのシステムデザインにおけるモデリング結果　161
A.1　製品システムモデルのモデリング結果　161
A.1.1　放射線計測システムの理想システム構成のモデリング結果　161

A.1.2　理想システム構成に関する制約関係のモデリング結果　166
A.2　設計空間固有モデルのモデリング結果　171
A.2.1　設計空間に関する要求のモデリング結果　171
A.2.2　設計空間に関する放射線計測システムの具体的なシステム構造のモデリング結果　174
A.2.3　具体的なシステム構造に関する制約関係のモデリング結果　177
A.2.4　最適化問題のモデリング結果　190
A.3　設計ツール固有モデルのモデリング結果　196
A.3.1　CAD(Geant4)のためのシステム構造のモデリング結果　196
A.3.2　CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係のモデリング結果　202

Ⅰ　本論文に関する公表論文　206
Ⅱ　本論文に関する学会発表　206

第 1 章　緒言

1.1　背景

本研究は、設計情報をモデルで表現し、製品システムを適正にデザインするモデルベースのシステムデザインにおいて、概念設計、基本設計から詳細設計へと一貫して繋がる、モデルベースでのデザインを可能とするモデリングの基本的な手法を構築するものである。システム[i)]、デザイン[ii)]、モデリング[iii)]といった言葉は、広く一般的ではあるが、それゆえそれらの言葉の定義は様々である。そのため、本論文で用いる上で、脚注ⅰ～ⅲのように定義する。以降は、それらの定義を前提とする。

製品システムと一括りで述べたが、その具体例は幾多の種類を数えることができる。現在、我々の生活、社会を支えているものは、ほとんどが製品システムである。テレビ、冷蔵庫、洗濯機などの家電機器、スマートフォン、パーソナルコンピュータなどの電子機器、自動車などの輸送機器、それら全てにおいて、ハードウェア、ソフトウェアが複雑に関係し、多数の機能を発揮している。そして、近年の科学技術の急速な進歩や高機能・多機能要求を背景に、製品システムは革新し続けている。一方、構成する要素とそれらの関係の増加により、製品システムは大規模化、複雑化し、その設計は困難を極めている[5-7)]。

そこで、システム的な観点、つまり、製品システム全体を俯瞰して、要求を満たすように適正にデザインを行うシステムデザインが重要である[8, 9)]。設計の上流段階からシステムデザインを行うことで、システム全体としての適正解を導出できる。これにより、各詳細設計ドメインへ適正な仕様を分配でき、手戻りの少ない設計を行うことができる。システ

[i)] 「システム」とは、「一つ以上の明記された目的を達成するために組織された相互に作用する要素の組合せ」[1)]とする。また、JIS でも述べられているように、システムは様々な形態をとる。そのため、本研究の対象とするシステムは、複合名詞を用いて「製品システム」と明確にする。「製品システム」とは、「ハードウェア、ソフトウェアをシステム要素[1)]とし、要求（目的）を満たすために、それらの要素を機械的、電気的に連結し構成した人工物」とする。

[ii)] 「デザイン」とは、「目的をもって具体的に立案・設計すること」[2)]とする。つまり、「システムデザイン」とは、「要求を満たすように、ハードウェア、ソフトウェアを含むシステム要素を探索、適正に構成し、システムを具体化すること」である。

[iii)] 「モデリング」とは、「工業製品、自然物、現象、概念などの実世界の対象物を、様々な方法でコンピュータ内に表現すること」とし、そのコンピュータ内に表現されたものを「モデル」とする[3)]。実世界の情報を全てコンピュータ内に模写することは極めて困難であるため、「モデル」は「ある対象から、当面する問題に必要なデータを抽出し、その対象を表現したもの」[4)]である。

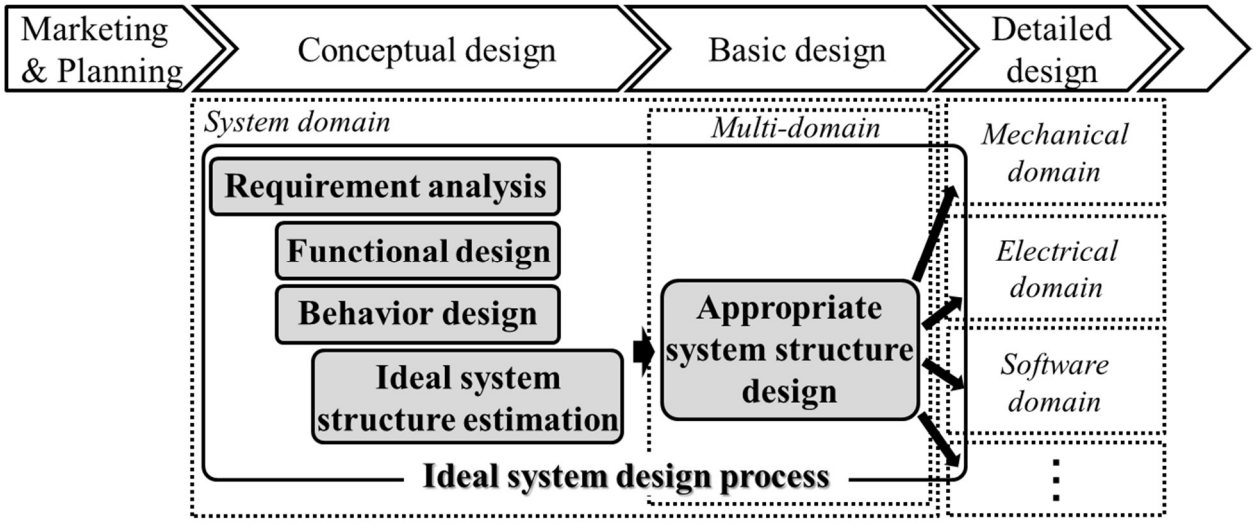


Fig. 1.1　Design process overview.

ムデザインに該当するプロセスは、文明が発展する中で経験的に行われてきたと考えられるが、近年の大規模・複雑な製品システムに対応すべく、体系化され、システムデザイン手法の構築[10, 11]および様々な設計支援技術の構築が進んでいる[12-15]。一般的に製品システムの設計プロセスは、Fig. 1.1 に示すように、マーケティングや企画、概念設計、基本設計、詳細設計と進んでいく[16]。本研究で述べる理想的なシステムデザインのプロセスは、システム的な観点である概念設計[iv]および基本設計[v]に位置付けられ、さらに各詳細設計[vi]へと繋がるプロセスである。

さらに、システムデザインでは、様々なトレードオフを考慮しながら多数の検討、評価を行うために、コンピュータ上でデジタルに設計情報を扱うことが必要である。そのため、設計情報をコンピュータ上に表現するモデリングが重要となっている。モデリングするこ

[iv] 「概念設計」とは、要求を分析し、その要求を満たすための機能や振る舞い、理想システム構成を検討するプロセスを含む。概念設計への入力は企画や要求、ステークホルダの情報であり、出力は詳細化された要求、機能や振る舞い、システムの方式や理想構成の情報である。

[v] 「基本設計」とは、概念設計の情報を基に、システムを実現するためのより具体的なシステム構造を設計するプロセスであり、ハードウェア、ソフトウェアの各詳細設計ドメインへの仕様を決定する。基本設計への入力は概念設計結果の情報であり、出力はシステムの具体的な構造や各詳細設計ドメインの仕様の情報である。

[vi] 「詳細設計」とは、基本設計で決定した仕様に基づき、それを現実のシステムへと投影し作り込むプロセスである。

とで、設計情報の可視化、理解促進、設計者間での情報共有を支援し、加えて、デジタル情報となることで一貫して管理、運用することが可能となる。さらに、設計変更時のトレーサビリティの確保や、改良設計時の設計情報の再利用などのメリットもある。

しかしながら、モデリングには大きな労力、時間、コストがかかるため、全ての設計情報を体系的にモデリングすることは難しく、まだまだ熟練設計者の勘と経験で補う設計が行われているのも事実である。これは、モデリングの概念やモデルの記述方法が様々な観点から提案されており、一貫して支援できるようなモデリング手法の構築がなされていないことが原因の一つである。グローバル化、スピード化が求められる現在のものづくりにおいて、システムデザインを行うことは必須であり、その設計プロセスを一貫してモデルベースで行うためのモデリング手法が求められている。

1.2　現状

システムデザインを支える規格･標準について述べる。システムデザインのプロセスは、さらに大きな範囲を対象とするシステムズエンジニアリングの一部として位置付けられる。システムズエンジニアリングのプロセスはいくつか標準化されているが[17-21]、代表的なものとして、国際規格 ISO 15288[17]およびその利用方法を示す INCOSE(International Council on Systems Engineering)の Systems Engineering Handbook[18]がある。システムデザインのプロセスは、それらの中で定義されているプロセスのうち、主にシステム要求定義プロセスとアーキテクチャ定義プロセスに当てはまる。システムのコンテキストやシステムへの要求の明確化、要求を満たす機能の検討、理想システム構成の創出などを行う考え方とそのプロセスが標準化されており、基盤とすることができる。しかし、あくまで概念的な内容のみで、具体的な進め方や特にモデリングの方法論などについては標準化されていないため、個別に検討する必要があり、本論文の研究対象はその部分に当たる。ISO 15288 の中で述べられているが、モデリングについては、ISO 42010[22]で定義されているアーキテクチャ記述標準に従ったモデリング手法とする必要がある。ISO 42010 によると、アーキテクチャ記述には Viewpoint の定義が必要であり、Viewpoint にはステークホルダが持つ関心事、使用するモデル種別や記述方法などを明記する必要があると規定されている。

そこで、本論文における“モデリング手法”の定義を行う。前述の通り、モデリングとは、物体や現象、概念などの実世界の対象を、ある観点で抽象化し、コンピュータ内に表現することであり、システムのモデリングについても ISO 42010 に同様の内容が規定され

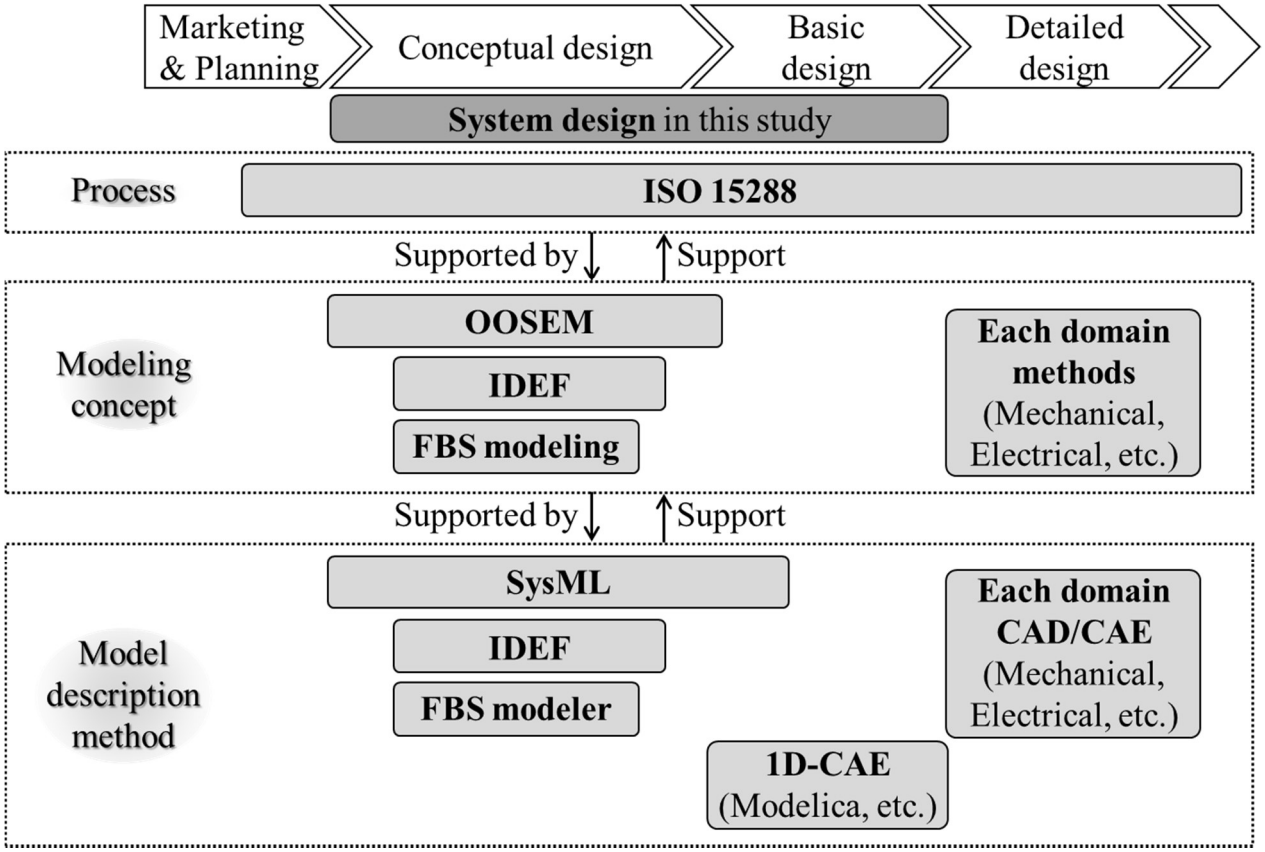


Fig. 1.2　Conventional modeling concepts and model description methods.

ている。したがって、モデリングに必要な項目としては、以下の二つが挙げられる。

① どのような情報を、どのような観点で捉え、抽象化するのか、というモデリングの考え方、概念。

② ①で捉えた情報をどのように表現、記述するのか、というモデルの記述方法。

本論文では、①を“モデリング概念”、②を“モデル記述方法”、①②を合わせて“モデリング手法”とする。それぞれの現状技術について以下に述べる。

まず、①のモデリング概念について、システムデザインと現状技術の関係を、Fig. 1.2 (中段)に示す。代表的なものとしては、OOSEM(Object-Oriented Systems Engineering Method)[23]、IDEF(Integration DEFinition)[24]、FBS(Function-Behavior-State)モデリング [25]が挙げられる。OOSEM とは、INCOSE の Systems Engineering Handbook でも述べられている、SysML(Systems Modeling Language)を用いた MBSE(Model-Based Systems Engineering)の方法論であり、要求、論理アーキテクチャ、物理アーキテクチャなどのモデリングを行うための手法である。IDEF とは、システムの機能、振る舞い、構造などを定義するための手法である。FBS モデリン

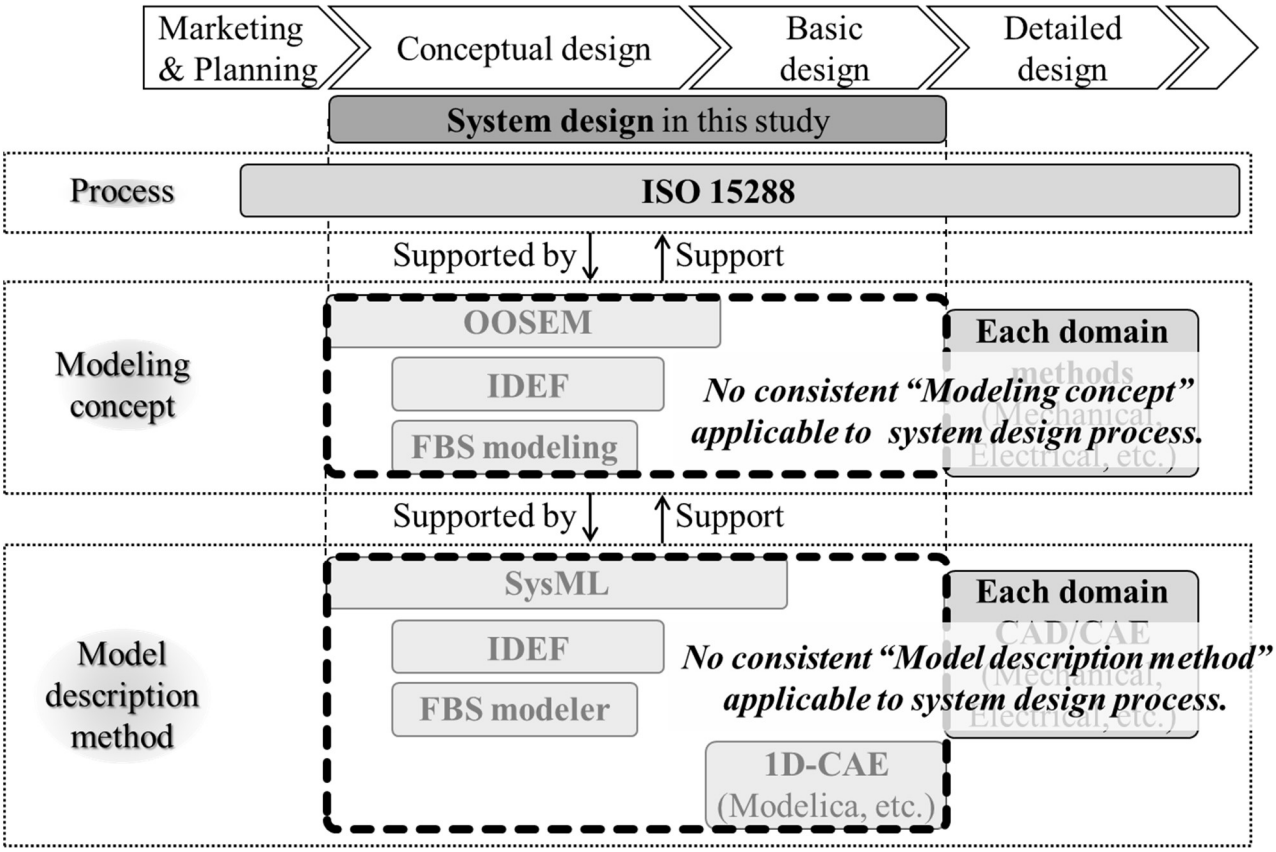


Fig. 1.3　Coverage for system design process.

グとは、機能、振る舞い、状態の関係を明確にし、機能設計を支援する手法である。

システムデザインのプロセスのうち、現状のモデリング概念では、要求分析、機能、振る舞い設計、理想システム構成の推定が支援されている。しかし、Fig. 1.3 (中段)に示すように、適正システム構造の設計に関しては言及されておらず、システムデザインのプロセスを網羅するような体系化されたモデリング概念が不足している。例えば、OOSEM のプロセスにおいては、代替案の最適化と評価が含まれるものの、その具体的なモデリングについては明確に定義されていない。したがって、概念設計、基本設計から各詳細設計ドメインに繋がる一貫したモデリング概念とはなっていない。現状では、設計者がそれぞれのプロセスに適したモデリング概念を用いながら、後述するモデル記述方法で表現し、モデリングを行っている。したがって、モデリング概念が不足している部分に関しては、どのような情報を、どのような観点で捉え、モデルとして表現するかは、設計者に依存している。また、各設計ドメインの熟練設計者が、モデルとして表現されていない設計情報に関しては、勘と経験により想像、解釈し、設計情報のギャップを埋め、設計を行っている。

次に②のモデル記述方法について、システムデザインと現状技術の関係を、Fig. 1.2 (下段)に示す。概念設計段階では、SysML[26)]、IDEF[24)]、FBS モデラ [25)]、基本設計段階では、Modelica[27)]などの 1D-CAE(Computer Aided Engineering)[28)]、各詳細設計段階では、各種CAD(Computer Aided Design)や CAE などが挙げられる。SysML は、要求、振る舞い、構造、パラメトリックな制約関係を記述することができ、OOSEM を含む MBSE を行うための記述方法として用いられている [29-31)]。IDEF、FBS モデラは、それぞれ前述のモデリング概念に基づき、表現するための記述方法である。1D-CAE は、機械系、電気系、制御系などマルチドメインに跨る設計をするために、物理現象に着目し、機能とその関係を数式で表現するための記述方法である。

Fig. 1.3 (下段)に示すように、システムデザインのプロセスをそのままの記述方法で網羅できるものは無いが、SysML は、製品システム全体の記述に適しており、モデル記述方法として有効である [32)]。さらに、必要に応じてモデルの意味や表現を拡張することができ、他のモデル記述方法で表現されたモデルとの連携がなされている [33, 34)]。これにより、モデルで表現した設計情報の変換、連携が可能となり、モデルベースの設計を支援している。しかし、個別のモデル情報、つまりデータとしての変換、連携にとどまっており、システムデザインにおける一貫した汎用的なモデル記述方法としては構築されていない。

1.3 課題

システムデザインのプロセスに対して、現状のモデリング手法をまとめたものを Fig. 1.4 に示す。概念設計段階ではモデリング手法が構築されており、要求、機能、振る舞い、理想システム構成の情報とそれらの関係をモデリングすることができる。しかし、基本設計段階、および基本設計から詳細設計へと繋がる部分については、モデリング手法が構築されておらず、一貫したモデルベースのシステムデザインの実現には至っていない。

デザインとは、要求(仕様)を満たすように具体化、具現化していくことであり、そこには設計者の意図やノウハウ、つまり“デザイン”の情報が介在する。概念設計段階では、“デザイン”の情報は要求と密接に繋がっており、概念設計のモデリング手法でも考慮されている。しかし、基本設計段階で加えられた“デザイン”の情報を、概念設計から繋げてモデリングするモデリング手法が無い。例えば、ある理想システム構成に対して、適正なシステム構造を導出するために、複数の設計案(ハードウェアであれば部品、形状、材料の選択など)を検討しても、その設計案はモデリングされるが、どのような要求(仕様)に対

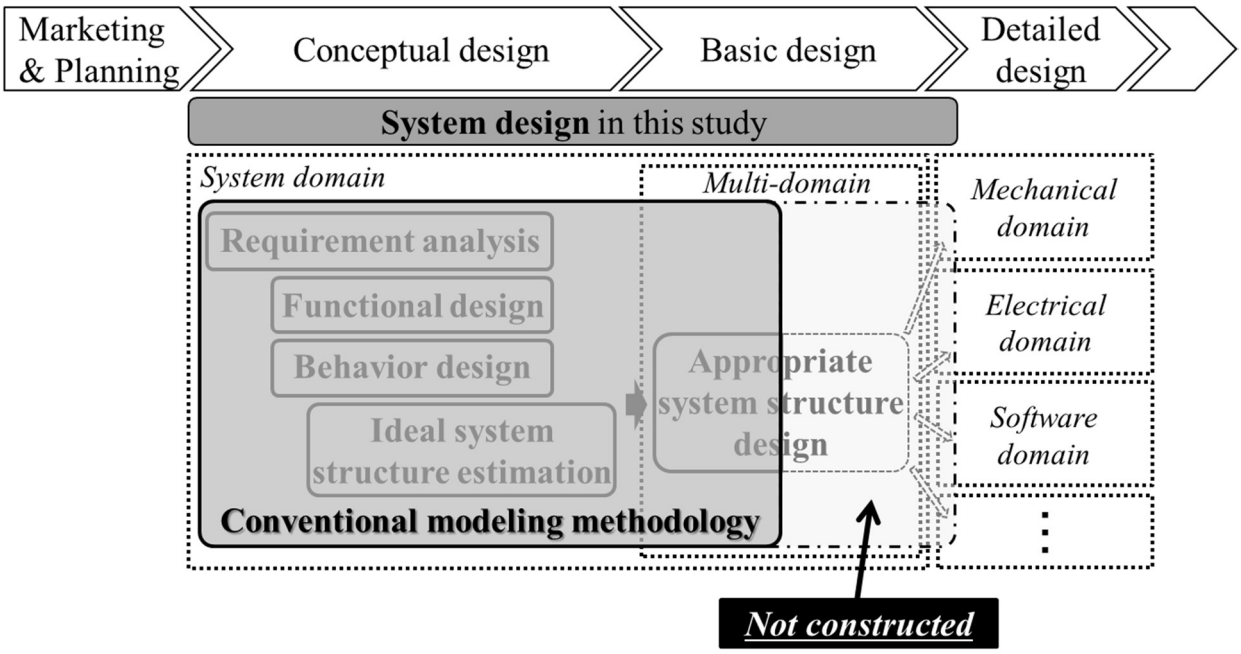


Fig. 1.4　Summary and problem of conventional modeling methodology.

してなぜその設計案にしたかという“デザイン”の情報はモデリングされない。また、適正システム構造を導出した後、仕様を各詳細設計ドメインへと分配し、繋げるためのモデリング手法が無い。特に、形状や配置といった実体情報について、基本設計段階において考慮されたポンチ絵レベルの実体情報ですらモデリングできていない。したがって、設計情報のギャップが生じ、モデルベースの利点である、設計情報のトレーサビリティの確保や再利用ができず、一貫したモデルベースのシステムデザインの障壁となっている。

つまり、概念設計、基本設計、さらには各詳細設計ドメインへの橋渡しとなるシステムデザインにおいて、どのような情報をどのような観点で捉えモデリングすればよいのか、そのモデリング概念と、それを表現するためのモデル記述方法を合わせたモデリング手法の構築が必要である。

1.4　本研究の目的と本論文の構成

そこで本研究では、設計情報をモデルで表現し、製品システムを適正にデザインするモデルベースのシステムデザインにおいて、設計情報のギャップを無くす、概念設計、基本設計、および詳細設計へと繋がるモデリングの概念とその記述方法を構築し、一貫したモデルベースでのデザインを支援するモデリング手法の構築を目的とする。現状技術に対す

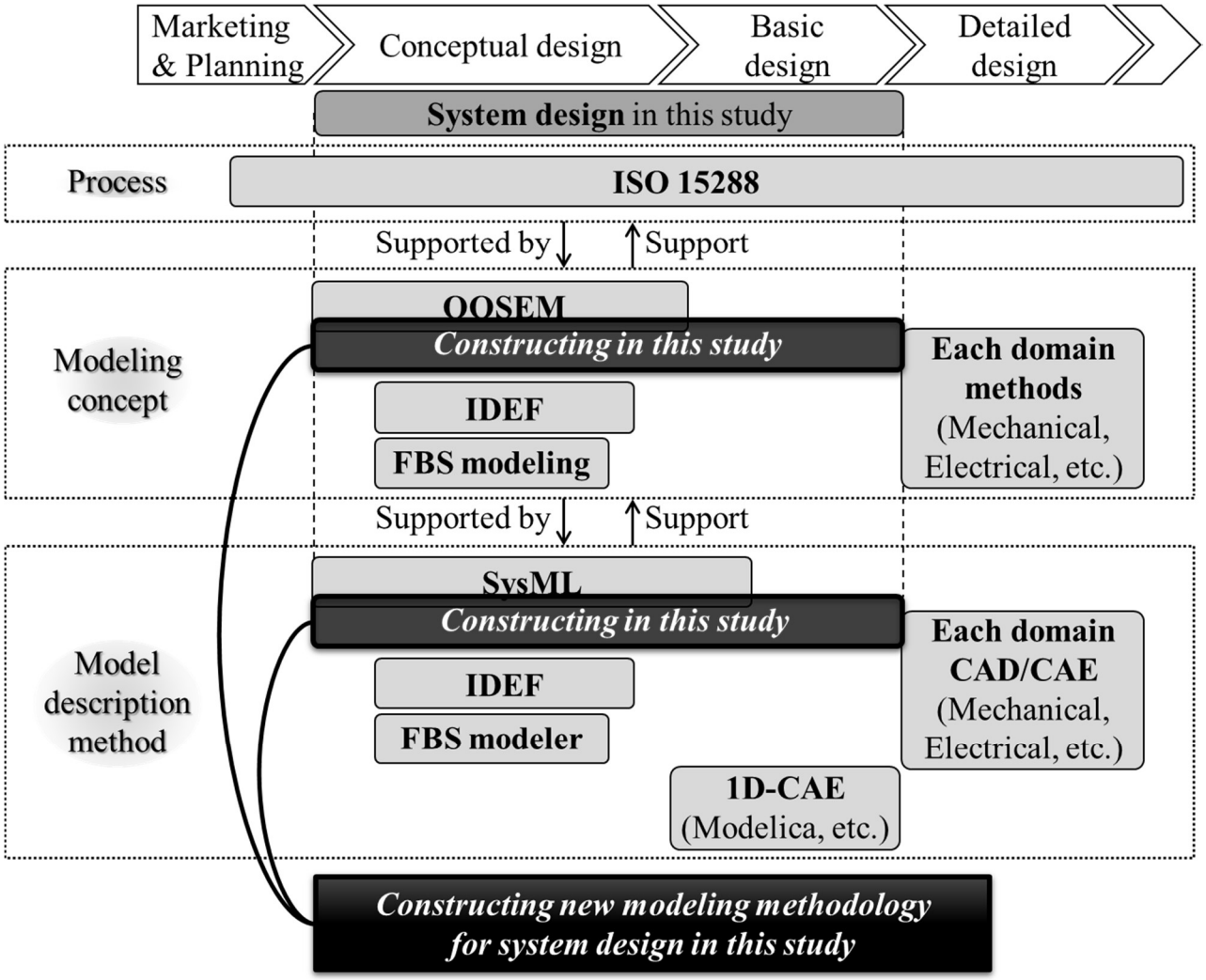


Fig. 1.5　Position of this study to the conventional technology.

る本研究の位置付けを Fig. 1.5 に示す。

本論文は、5 章から構成される。本研究のフローチャートを Fig. 1.6 に示す。第 1 章は本章である。第 2 章では、システムデザインにおいて、基本設計および各詳細設計ドメインへの繋がりを考慮し、どのように設計情報を捉えるべきか、そのモデリング概念の構築を行う。第 3 章では、第 2 章で構築したモデリング概念を用いて定義手法の構築と実装を行う。第 4 章では、第 2 章、第 3 章で構築した新しいシステムデザインのモデリング手法を用いて、放射線計測システムを対象としたシステムデザインを行い、検証と応用展開を行う。最後に、第 5 章で結論を示す。

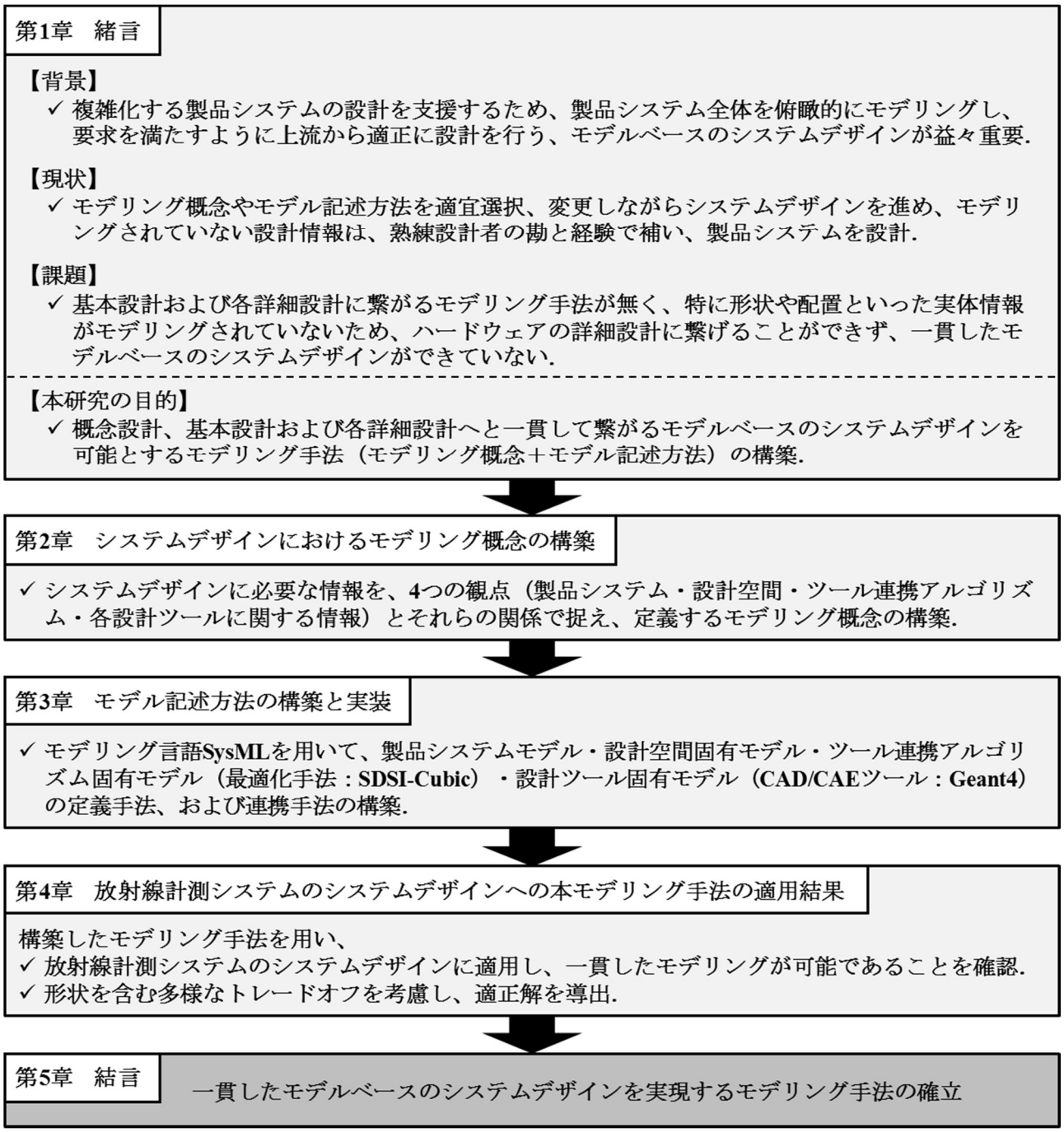


Fig. 1.6　Flowchart of this study.

参考文献

1) 日本工業規格，“JIS X 0170”，(2013).

2) 松村明，“大辞泉”，小学館，(2016).

3) 岩田一明，荒井栄司，NEDEK 研究会，“モデリング工学入門”，培風館，(1999).

4) 日本工業規格，“JIS B 3401”，(1993).

5) 浅居喜代治，“基礎システム工学”，オーム社，(2001).

6) 岸光男，“システム工学”，共立出版，(1995).

7) 佐々木正文，“基礎システム工学”，共立出版，(1972).

8) 佐藤了平,“イノベーション創出の鍵を握るシステムデザイン･インテグレーション(SD･SI)と課題”，15th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”, (2009) 1-6.

9) 大富浩一，“設計工学の目指すところ：設計からデザインへ”，日本機械学会論文集(C 編)，Vol. 75，No. 751 (2009) 516-523.

10) 村田秀則,“パラメトリックモデルベースのシステムデザイン手法におけるシステム最適化に関する研究”，大阪大学，(2015).

11) 大富浩一，羽藤武宏，“1DCAE によるものづくりの革新”，東芝レビュー，Vol. 67，No. 7 (2012) 7-10.

12) 青山和浩，大泉和也，古賀毅，“製品システム設計におけるシステムの構造分析とマネジメント”，横幹，Vol. 10，No. 1 (2016) 22-37.

13) 関研一，西村秀和，朱紹鵬，Laurent Balmelli，“民生機器開発における機能・構造モデルを用いた分散協調設計　(SysML 製品モデルと DSM を利用したモジュール設計プロセスの計画)”，日本機械学会論文集(C 編)，Vol. 78，No. 785 (2012) 187-200.

14) 野間口大，下村芳樹，冨山哲男，“設計者の思考過程のモデルを利用した設計知識管理システム”，人工知能学会論文誌，Vol. 20，No. 1 B (2005) 11-24.

15) 梅田靖，“モジュール化設計・生産の現状と展望”，精密工学会誌，Vol. 66，No. 7 (2000) 1009-1011.

16) Kevin Forsberg，Hal Mooz，Howard Cotterman，“Visualizing Project Management: Models and Frameworks for Mastering Complex Systems, 3rd Edition”，Wiley，(2005).

17) ISO (International Organization for Standardization)，“ISO/IEC 15288”，(2015).

18) INCOSE (International Council on Systems Engineering),“Systems Engineering Handbook; A

Guide for System Life Cycle Processes and Activities; 4th Edition”, Wiley, (2015).
19) NASA Headquarters, “NASA Systems Engineering Handbook”, Military Bookshop, (2007).
20) ANSI (American National Standards Institute), “ANSI/EIA 632”, (2003).
21) IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), “IEEE 1220”, (2005).
22) ISO, “ISO/IEC/IEEE 42010”, (2011).
23) Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner, “A Practical Guide to SysML”, Morgan Kaufmann, (2009).
24) Richard J. Mayer, Capt. Michael K. Painter, Paula S. deWitte, “IDEF Family of Methods for Concurrent Engineering and Business Re-engineering Applications”, http://www.idef.com/downloads/IDEFFAMI.pdf, (1992).
25) 梅田靖，冨山哲男，吉川弘之，“機能設計支援のための FBS モデリングの提案”，精密工学会誌，Vol. 63，No. 6 (1997) 795-800.
26) OMG (Object Management Group), “OMG Systems Modeling Language, Version 1.3”, http://www.omg.org/spec/SysML/1.3/PDF, (2012).
27) Modelica Association, “Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling, Language Specification, Version 3.3 Revision 1”, https://www.modelica.org/documents/ModelicaSpec33Revision1.pdf, (2014).
28) 大富浩一，“1DCAE によるものづくり　第 4 部 : シミュレーションと 1DCAE”，シミュレーション，Vol. 33，No. 4 (2014) 283-287.
29) Ana Luísa Ramos, José Vasconcelos Ferreira, Jaume Barceló, “Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, Vol. 42, No. 1 (2012) 101-111.
30) 独立行政法人　情報処理推進機構，“モデルベースシステムズエンジニアリング導入の手引き”，http://www.ipa.go.jp/files/000033609.pdf, (2013).
31) 西村秀和, 藤倉俊幸, “モデルに基づくシステムズエンジニアリング”, 日経BP社, (2015).
32) Laurent Balmelli, “An Overview of the Systems Modeling Language for Products and Systems Development”, Journal of Object Technology, Vol. 6, No. 6 (2007) 149-177.
33) Christiaan J.J. Paredis, Yves Bernard, Roger M Burkhart, Hans-Peter de Koning, Sanford Friedenthal, Peter Fritzson, Nicolas F Rouquette, Wladimir Schamai, “An Overview of the SysML-Modelica Transformation Specification”, 2010 INCOSE International Symposium, (2010).

34) Andrea Sindico，Marco Di Natale，Gianpiero Panci，“Integrating SysML with Simulink using Open-Source Model Transformations”， 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications，(2011).

第 2 章　システムデザインにおけるモデリング概念の構築

2.1　緒言

大規模化･複雑化している製品システムを効率良く適正にデザインし､設計情報のトレーサビリティの確保や再利用を可能とするモデルベースのシステムデザインが重要である。しかし、システムデザインのプロセスを網羅するモデリング手法がなく、一貫したモデルベースのシステムデザインを実現するには至っていない。そこで本章では、まずモデリング手法に必要なモデリング概念を検討した。以下に、その結果を述べる。

2.2　新しいモデリング概念の提案

システムデザインは、概念設計、基本設計を行い、詳細設計への仕様を決定するプロセスであり、以下のように整理される。

① 概念設計

入力：ユーザ要求、ステークホルダの情報。

(ア)要求分析：マーケティングや企画で明確化されたユーザ要求(性能、コスト、機能など)を分析、分解し、また、設計対象の製品システムと外部システムおよび外部環境との関係を明確にし､製品システムとして満たすべき詳細な要求を明らかにする。

(イ)機能設計､振る舞い設計:要求を満たすために､製品システムが実現すべき機能、振る舞いを検討する。

(ウ)理想システム構成の推定:要求を満たす機能､振る舞いを実現するハードウェア、ソフトウェアを含めた理想的な製品システム構成を推定する。

出力：製品システムの方式や構成の情報。

② 基本設計

入力：製品システムの方式や構成の情報。

(ア)適正システム構造の設計：概念設計の情報を基に、製品システムを実現し価値を最大化する適正なシステム構造を導出し、ハードウェア、ソフトウェアの各詳細設計ドメインへの仕様を決定する。

出力：製品システムの具体的な構造や各詳細設計ドメインの仕様の情報。

前章で述べた通り、これらシステムデザインのプロセスのうち、概念設計については、MBSE を実践するための OOSEM のモデリング概念が有効であり、ベースとして考えるこ

とができる。しかし、基本設計および詳細設計に繋がる部分に関してはモデリング概念が構築されていないため、その解決が必要である。

モデリング概念を構築するためには、どのような情報を、どのような観点で捉えるかを明らかにする必要がある。基本設計では、製品システム全体としての適正解を導出する。つまり、製品システムがハードウェア、ソフトウェアから構成され、多数の機能を発揮する点から見て、マルチドメインに跨る問題をシステム的な観点で捉え、検討、評価する必要がある。そこで、マルチドメインに関係する設計に必要な情報を整理し、システム的な観点でまとめることで、モデリング概念を提案する。

マルチドメインとは、機械系、電気系、制御系、ソフト系など、様々な設計ドメインを含むため、まずは 1 つの設計ドメインに対して、設計に必要な情報を整理する。設計とは、ある設計対象に対して、要求や仕様に合うように設計者が解釈し、目的や意図を持って、設計案を導出することである [1)]。つまり、設計におけるモデルとは、設計対象“Object”に関する情報と、設計目的や設計意図といった設計“Design”に関する情報を組合せて、写像したものである。ある設計ドメイン : i におけるモデリング“Modeling”に関する情報を集合として捉え、表現したものが Fig. 2.1 であり、その関係を式(2.1)に示す。

$$M_i \supset O_i \cup D_i \tag{2.1}$$

M_iは設計ドメイン i における“Modeling”に関する情報の集合、O_iは設計ドメイン i における“Object”に関する情報の集合、D_iは設計ドメイン i における“Design”に関する情報の集合である。

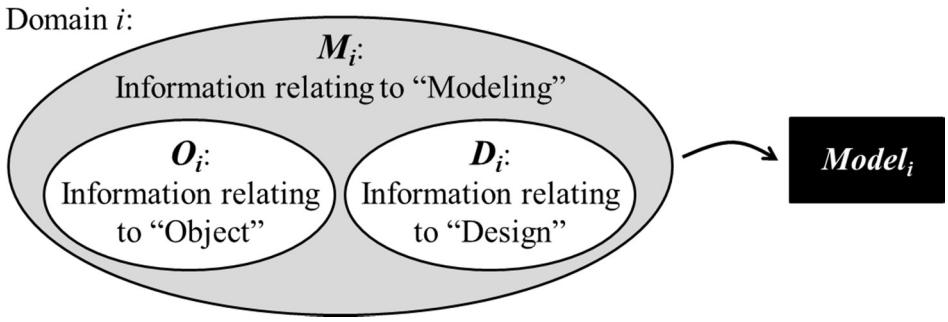


Fig. 2.1　Modeling image of domain i.

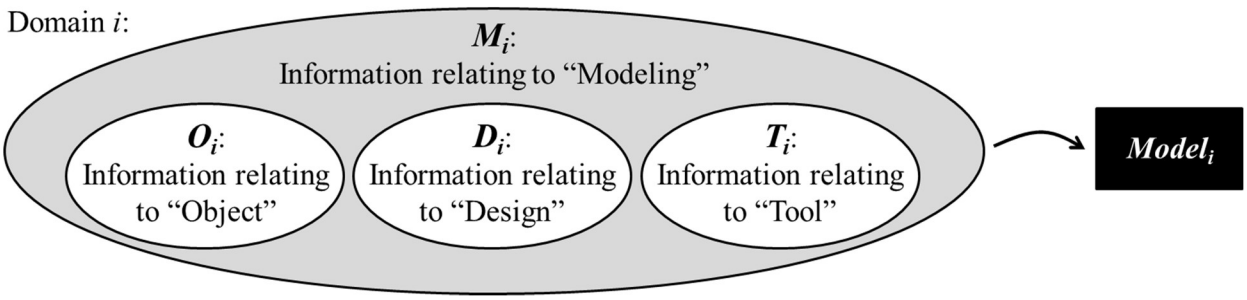


Fig. 2.2　Modeling image considering modeling tool of domain i.

さらに、実際にモデリングを行う際は、その設計ドメインに適したモデリングツールを用いて行っている。これは、モデル記述方法やモデリングツールのマニュアルに従って、モデルを記述しているということである。したがって、実際にはモデリングツール“Tool”に関する情報も組み合わさっている。そこで、前述の集合に“Tool”に関する情報の集合追加したものを、Fig. 2.2 に表現し、その関係を式(2.2)に示す。

$$M_i = O_i \cup D_i \cup T_i \tag{2.2}$$

T_iは設計ドメイン i における“Tool”に関する情報の集合である。

以上により、ある設計ドメイン : i におけるモデリング“Modeling”に関する情報を定式化できた。

次に、マルチドメインを考慮する。k 種類の設計ドメイン(i=1～k)からなるシステムと仮定すると、Fig. 2.3、式(2.3)のように示すことができる。

$$M_{system} \supset M_1 \cup M_2 \cup \cdots \cup M_k \tag{2.3}$$

M_{system}はシステムドメイン(マルチドメイン)における“Modeling”に関する情報の集合、M_1～M_kは k 種類の各設計ドメインにおける“Modeling”に関する情報の集合である。

さらに、式(2.2)を用いて式(2.3)の右辺を式変形すると、下記のように表すことができる。

$$M_1 \cup M_2 \cup \cdots \cup M_k = (O_1 \cup D_1 \cup T_1) \cup (O_2 \cup D_2 \cup T_2) \cup \cdots \cup (O_k \cup D_k \cup T_k) \tag{2.4}$$

$$= (O_1 \cup O_2 \cup \cdots \cup O_k) \cup (D_1 \cup D_2 \cup \cdots \cup D_k) \cup (T_1 \cup T_2 \cup \cdots \cup T_k) \tag{2.5}$$

O_1～O_kは k 種類の各設計ドメインにおける“Object”に関する情報の集合、D_1～D_kは k 種類の各設計ドメインにおける“Design”に関する情報の集合、T_1～T_kは k 種類の各設計ドメインにおける“Tool”に関する情報の集合である。

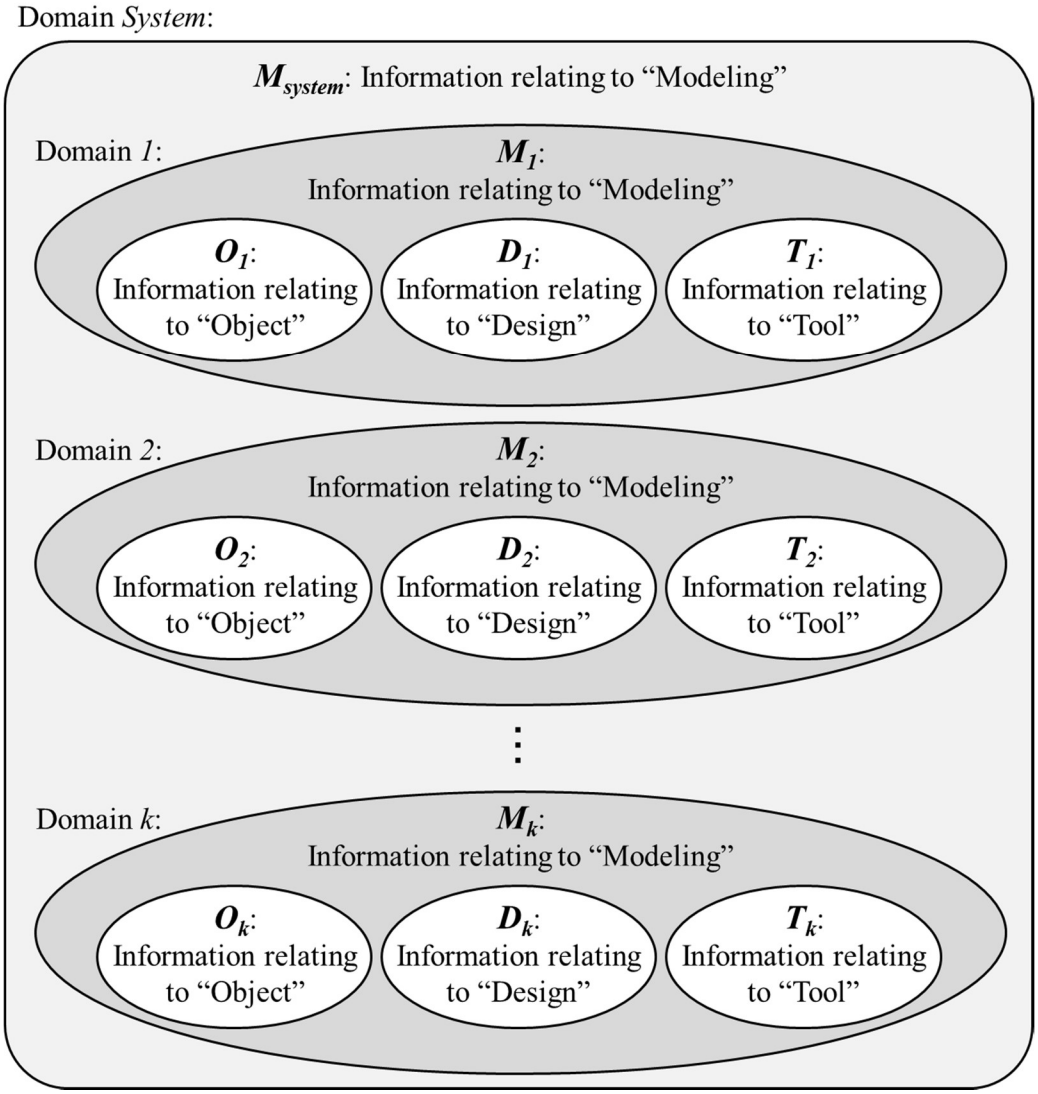


Fig. 2.3　System consisting of multi-domain (k kinds of domains).

各設計ドメインとは、システムから見ると各サブシステム(システム要素)の設計である。そこで、次式のようにまとめる。

$$O_{subs} = O_1 \cup O_2 \cup \cdots \cup O_k \tag{2.6}$$

$$D_{subs} = D_1 \cup D_2 \cup \cdots \cup D_k \tag{2.7}$$

$$T_{subs} = T_1 \cup T_2 \cup \cdots \cup T_k \tag{2.8}$$

O_{subs}は各サブシステム設計の"Object"に関する情報の集合、D_{subs}は各サブシステム設計の"Design"に関する情報の集合、T_{subs}は各サブシステム設計の"Tool"に関する情報の集合である。

以上により、システムドメイン(マルチドメイン)における"Modeling"に関する情報の

集合M_{system}は、Fig. 2.4、式(2.9)のように表すことができる。

$$M_{system} \supset O_{subs} \cup D_{subs} \cup T_{subs} \tag{2.9}$$

ここで、サブシステムに関する情報をシステム的な観点から捉え直す。システムには、サブシステム(システム要素)とそれら要素間の関係が必要である[2)]。そこで新たに、各サブシステム設計の“Object”の関係に関する情報の集合$O_{relation}$、各サブシステム設計の“Design”の関係に関する情報の集合$D_{relation}$、各サブシステム設計の“Tool”の関係に関する情報の集合$T_{relation}$を導入すると、Fig. 2.5、式(2.10)、(2.11)のように表すことができる。

$$M_{system} = (O_{relation} \cup O_{subs}) \cup (D_{relation} \cup D_{subs}) \cup (T_{relation} \cup T_{subs}) \tag{2.10}$$

$$= O_{system} \cup D_{system} \cup T_{relation} \cup T_{subs} \tag{2.11}$$

O_{system}はシステムドメインの“Object”に関する情報の集合、D_{system}はシステムドメインの“Design”に関する情報の集合である。“Tool”に関する情報については、汎用的に全ての設計ドメインに対応するようなモデリングツールおよび設計ツールが現状では無いことから、個別のツールに対応する必要があり、システムドメインとして統合はできない。

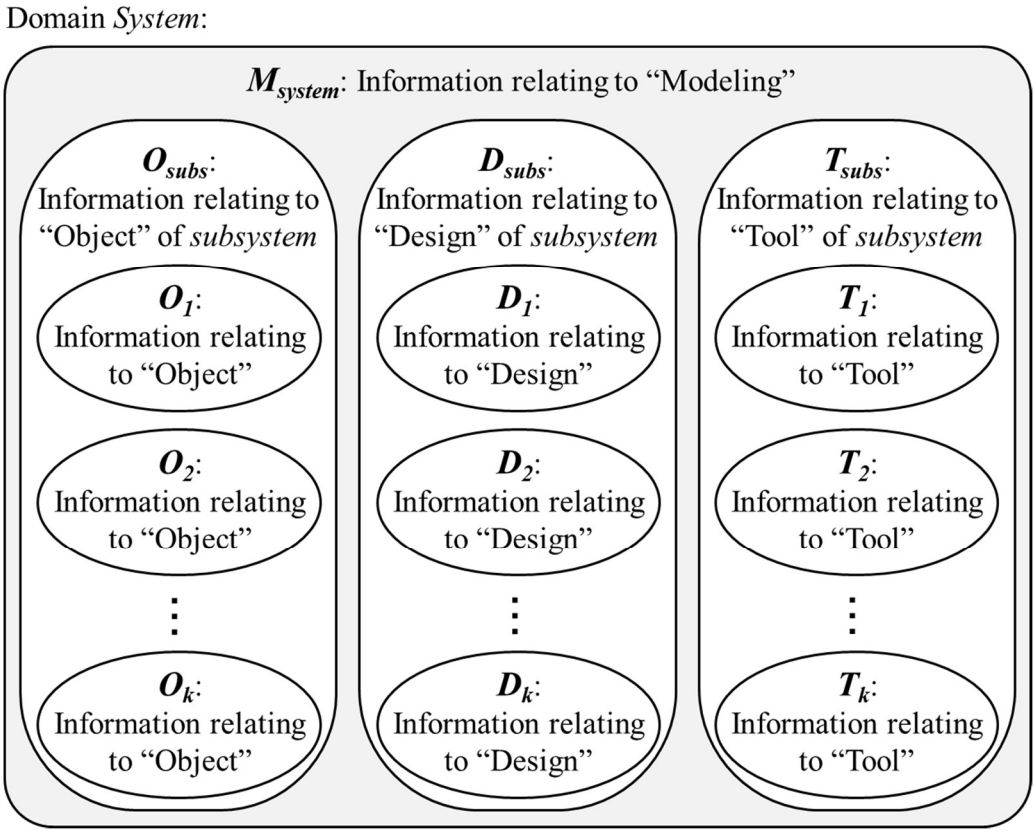


Fig. 2.4　Organizing information relating to modeling of multi-domain.

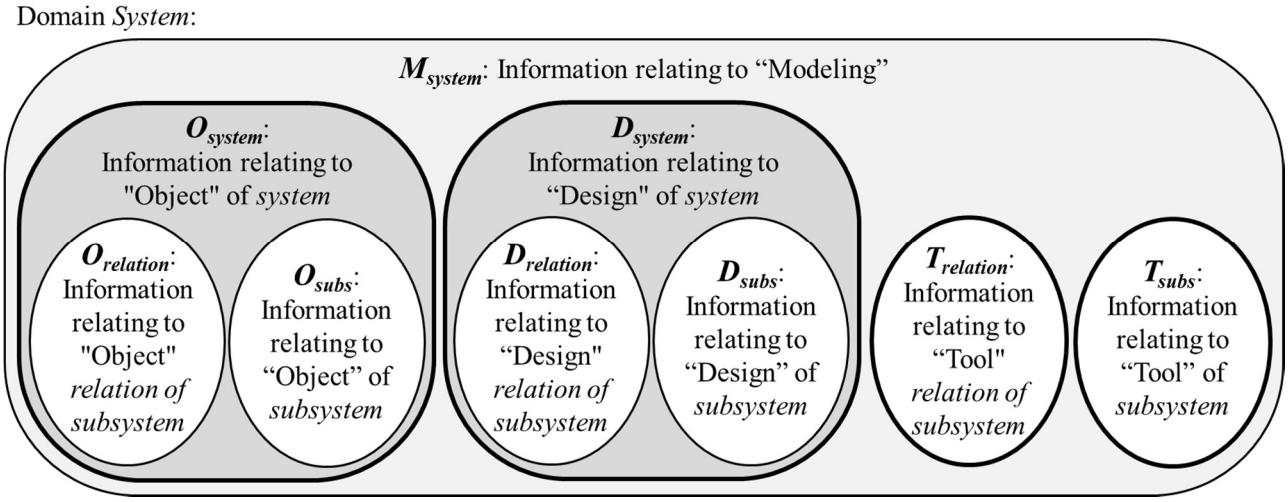


Fig. 2.5　Organizing information relating to modeling of system domain.

以上により、システムデザインにおける、マルチドメインに関係するデザインに必要な情報は、以下の 4 つの情報に整理できる。

① システムドメインの“Object”に関する情報、つまり、システムデザインで対象とする製品システムに関する情報。

② システムドメインの“Design”に関する情報、つまり、システムデザインを行う設計目的や設計意図に関する情報。

③ 各設計ドメインで用いるモデリングツール(設計ツール)間の関係に関する情報。

④ 各設計ドメインで用いるモデリングツール(設計ツール)に関する情報。

上記の整理できた情報に従って、システムデザインにおける新しいモデリング概念を提案する。現状技術として、システムデザインを支援する設計手法やフレームワークは数多く提案されている[3)]。したがって、どのシステムデザイン手法を用いるかで、“Design”の持つ情報、つまり設計目的や設計意図をどのように与えるかは変わると考えられる。また、システムデザイン手法やそのフレームワークによって、どのような設計ツールをどのように組み合わせて設計を行うかも変わると考えられる。そこで、前述の②の設計目的や設計意図に関する情報と、③のモデリングツール(設計ツール)間の関係に関する情報は、システムデザイン手法に依存する情報と考えることができる。

提案するシステムデザインのためのモデリング概念を Fig. 2.6 に示し、以下にまとめる。

(I) 製品システムに関する情報 : 前述の①に相当し、概念設計で導出された要求、機能、

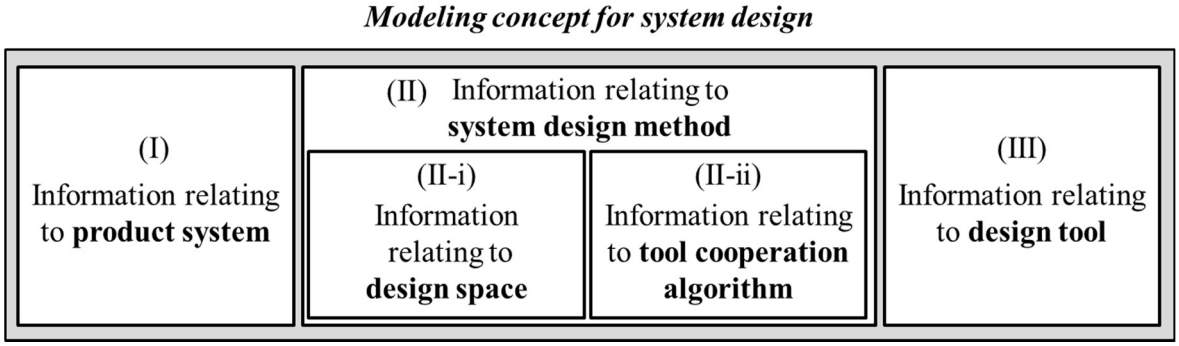


Fig. 2.6　Proposal modeling concept for system design.

振る舞い、理想システム構成に関する情報を含む製品システムに関する情報である。

(II) システムデザイン手法に依存する情報であり、以下の 2 つの情報を含む。

(II-i)　設計空間に関する情報：前述の②に相当し、システムデザインを行う設計目的や設計意図、つまりどの範囲でどのような設計をするかという設計空間に関する情報である。

(II-ii)　ツール連携アルゴリズムに関する情報：前述の③に相当し、各設計ドメインで用いる設計ツール間の関係、つまりどのような順番でどのような問題に対しどの設計ツールを用いるのかという、ツール連携のためのアルゴリズムに関する情報である。

(III) 各設計ツールに関する情報：前述の④に相当し、各設計ドメインで用いる設計ツールに関する情報である。

また、これら上記の情報は要求から全て紐づくため、これら 4 つの情報に加え、4 つの情報を関係付ける情報も必要である。

以上、システムデザインのための新しいモデリング概念を提案できたので、次節では現状のシステムデザイン手法で扱う情報との比較を行い、提案した新しいモデリング概念を検証する。

2.3　提案したモデリング概念と現状のシステムデザイン手法で扱う情報との比較

2.3.1　SDSI-Cubic(System Design System Integration-Cubic)手法で扱う情報との比較

本項では、システムデザイン手法の 1 つである SDSI-Cubic(System Design System Integration-Cubic)手法[4)]で扱う情報と、提案した新しいモデリング概念で扱う情報との比較

を行う。

SDSI-Cubic 手法とは、システムデザインの基本設計段階に必要な 5 つの機能を連携し、さらに、自動実行可能なアルゴリズムにより、製品システムの適正システム構成を効率良く導出する手法である。5 つの機能とは、製品システムのモデリング、設計タスク抽出、評価手法構築、設計ワークフロー構築、最適化実行である。モデリング後の 4 つの機能については、モデル情報を用いて自動実行が可能である。SDSI-Cubic 手法の特徴としては、マルチドメインに跨る複雑な依存関係を解きほぐし、適正に分割、設計順序を適正に構築することで、効率良く最適化が可能なことである。

したがって、SDSI-Cubic 手法では、各機能で必要な情報を全てモデリングする必要がある。SDSI-Cubic 手法で用いるモデルの例を Fig. 2.7 に示す。モデル記述方法としては、SysML[5)] を採用している。製品システムの構造は Fig. 2.7 上段左側のブロック定義図(bdd Product1)、それらの構成要素が持つ属性は Fig. 2.7 中段左側の内部ブロック図(ibd Part2)、属性間の関係は Fig. 2.7 上段右側のパラメトリック図(par Part2)、パラメトリック図で利用される制約式は制約ブロックを用いて Fig. 2.7 中段右側のブロック定義図(bdd Constraint)に記述する。これらは製品システムに関する情報である。これらのモデル情報を用いて設計タスク抽出、評価手法構築、設計ワークフロー構築を行う。さらに、最適化を行うために、最適化問題を記述するためのステレオタイプを追加し、Fig. 2.7 下段中央の最適化図(bdd Optimization)に記述する。これは、SysML の拡張機能を利用している [6)]。最適化図では、目的関数には<<objective function>>というステレオタイプを付け、最適化方向の情報を付与する。設計変数には<<design parameter>>というステレオタイプを付け、数値の型、最小値、最大値、(もしくは離散値)の情報を付与する。その他のパラメータについては、<<ValueType>>のステレオタイプを用いて記述し、数値の型、単位、初期値の情報を付与する。最適化図を追加することで、最適化までを自動実行可能なモデルとしている。最適化に関する情報、つまり設計空間に関する情報が記述されている。

以上により、SDSI-Cubic 手法で扱う情報は、製品システムに関する情報と設計空間(最適化問題)に関する情報であることが明らかになった。モデル情報としては、製品システムに関する情報に設計空間に関する情報が内包される形で記述されている。

前節で提案したモデリング概念の情報と SDSI-Cubic 手法で扱う情報との比較を、Fig. 2.8 に示す。提案したモデリング概念の情報のうち、(Ⅰ)製品システムに関する情報と(Ⅱ-ⅰ)設計空間に関する情報は SDSI-Cubic 手法でも扱う。つまり、SDSI-Cubic 手法に対しては、

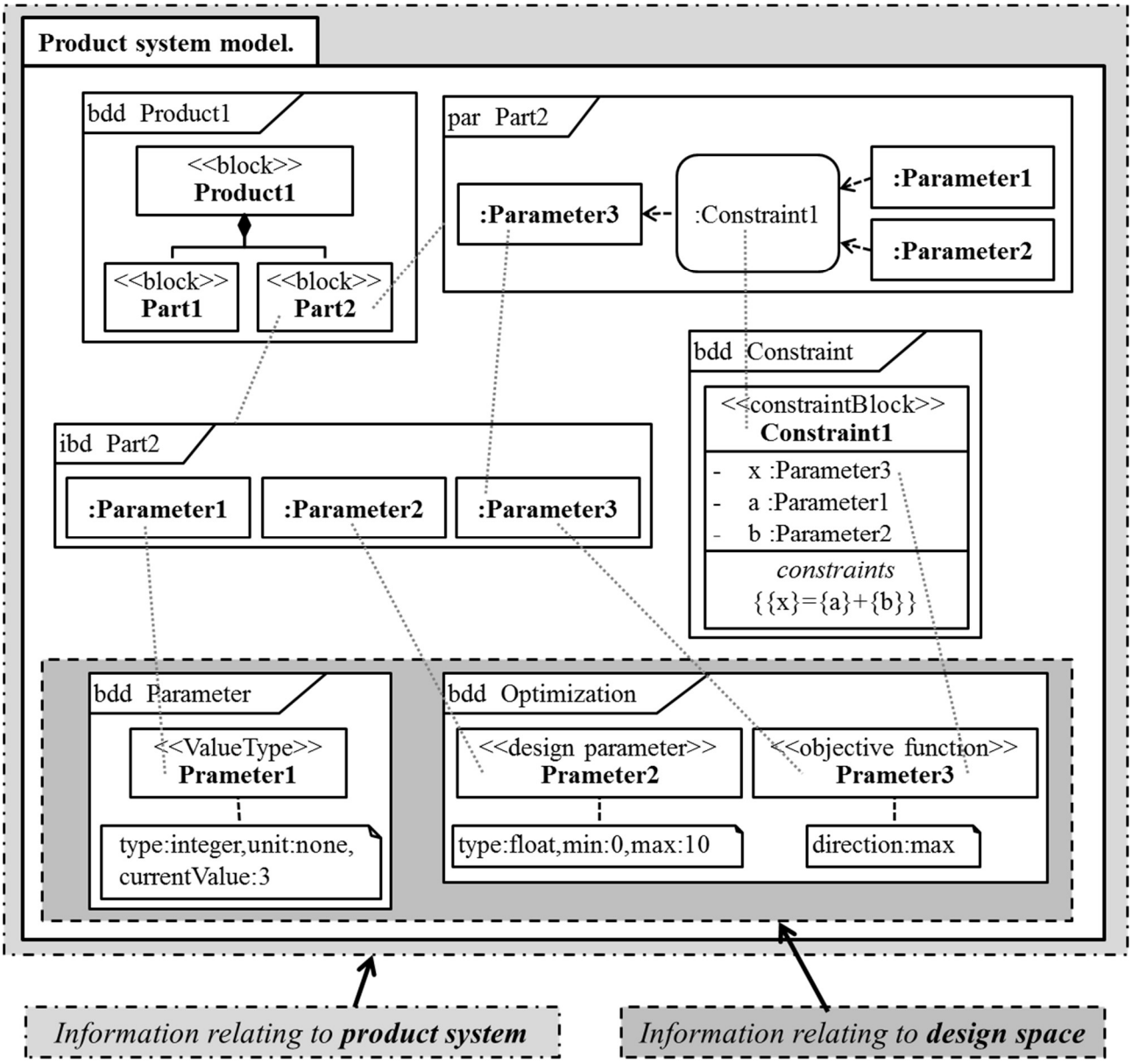


Fig. 2.7　Model example of SDSI-Cubic methodology.

提案したモデリング概念でその情報を満たしている。逆に、SDIS-Cubic 手法では、(Ⅱ-ⅱ)設計ツール連携のアルゴリズムに関する情報や(Ⅲ)各設計ドメインの設計ツールに関する情報を記述しておらず、理想とするシステムデザインのプロセスのうち、本研究の課題で挙げた基本設計から各詳細設計ドメインへと繋がる部分が実現できていないことがわかる。SDSI-Cubic 手法では、マルチドメインに跨る複雑な依存関係を解きほぐすことで、適正な設計ドメインに分割し設計することができるため、各設計ドメインの設計ツールとの連携

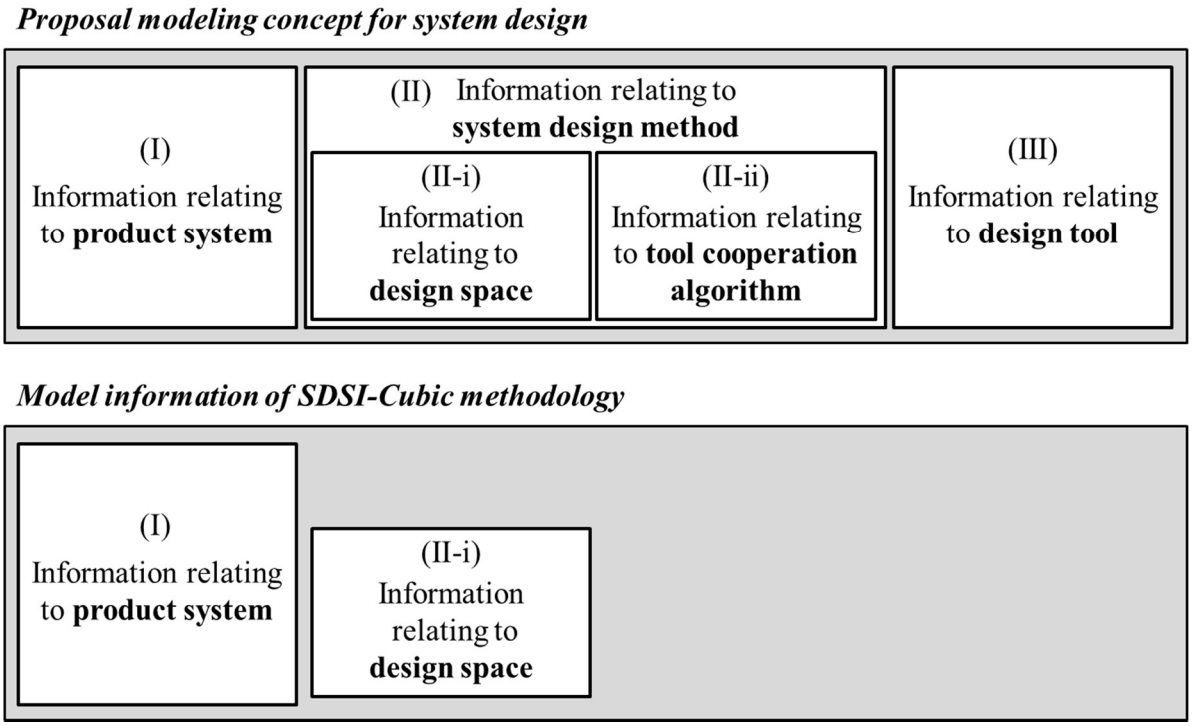


Fig. 2.8　Comparison of information of proposal modeling concept and SDSI-Cubic methodology.

を果たすことができれば、システムデザインを支援する有力な手法となり得ると推察できる。

以上、SDSI-Cubic 手法に対して提案したモデリング概念を展開し、理想とするシステムデザインのプロセスが実現できる可能性を示すことができた。

2.3.2　SLIM(Systems Lifecycle Management)手法で扱う情報との比較

本項では、SLIM(Systems Lifecycle Management)手法[7)]で扱う情報と、提案した新しいモデリング概念で扱う情報との比較を行う。

SLIM 手法とは、製品システムに関係する情報を統合的に扱い管理するために、SysML で記述したモデルと各設計ドメインのモデルとの連携を取り、モデルを一貫して扱う手法およびフレームワークである。SysML と機械系 CAD モデル(モデリングツール：NX(シーメンス PLM ソフトウェア社製))との連携を行うための、SysML で記述したモデルの例を Fig. 2.9 に示す。製品システムの構造は、Fig. 2.9 左側のブロック定義図で記述する(bdd ProductA)。これは、製品システムに関する情報である。パラメータ間の関係をパラメトリッ

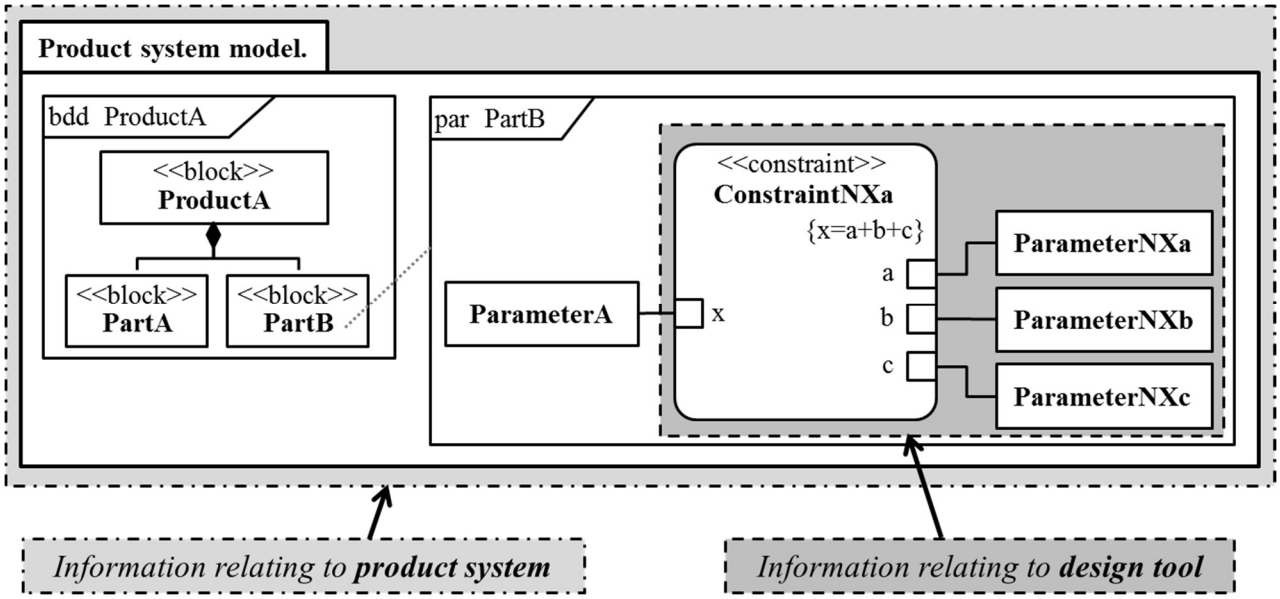


Fig. 2.9　Model example of SLIM methodology.

ク図で記述するのだが、製品システムが持つパラメータと NX で記述した CAD モデルが持つパラメータは必ずしも一致しない。そのため、CAD モデルがもつパラメータ(ParameterNXa, ParameterNXb, ParameterNXc)を製品システムのモデル内に記述し、それらのパラメータと製品システムが持つパラメータ(ParameterA)との関係、および関係式を記述する(Fig. 2.9 右側(par PartB))。これは、設計ツールに関する情報である。上記の記述方法を用いることで、SysML で記述したモデルと NX の CAD モデルとの対応関係が記述できる。

以上により、SLIM 手法で扱う情報は、製品システムに関する情報と設計ツールに関する情報であることが明らかになった。モデル情報としては、製品システムに関する情報に設計ツールに関する情報が内包される形で記述されている。

前節で提案したモデリング概念の情報と SLIM 手法で扱う情報との比較を、Fig. 2.10 に示す。提案したモデリング概念の情報のうち、(Ⅰ)製品システムに関する情報と(Ⅲ)各設計ドメインの設計ツールに関する情報は SLIM 手法でも扱う。つまり、SLIM 手法に対しては、提案したモデリング概念でその情報を満たしている。逆に、SLIM 手法では、(Ⅱ-ⅰ)設計空間に関する情報や(Ⅱ-ⅱ)設計ツール連携のアルゴリズムに関する情報を記述しておらず、理想とするシステムデザインのプロセスのうち、基本設計での適正システム構造の導出が実現できていないことがわかる。これは、SLIM 手法がデザインされた結果を管理、運用する手法であり、システムデザインの一連のプロセスが考慮されていないためである

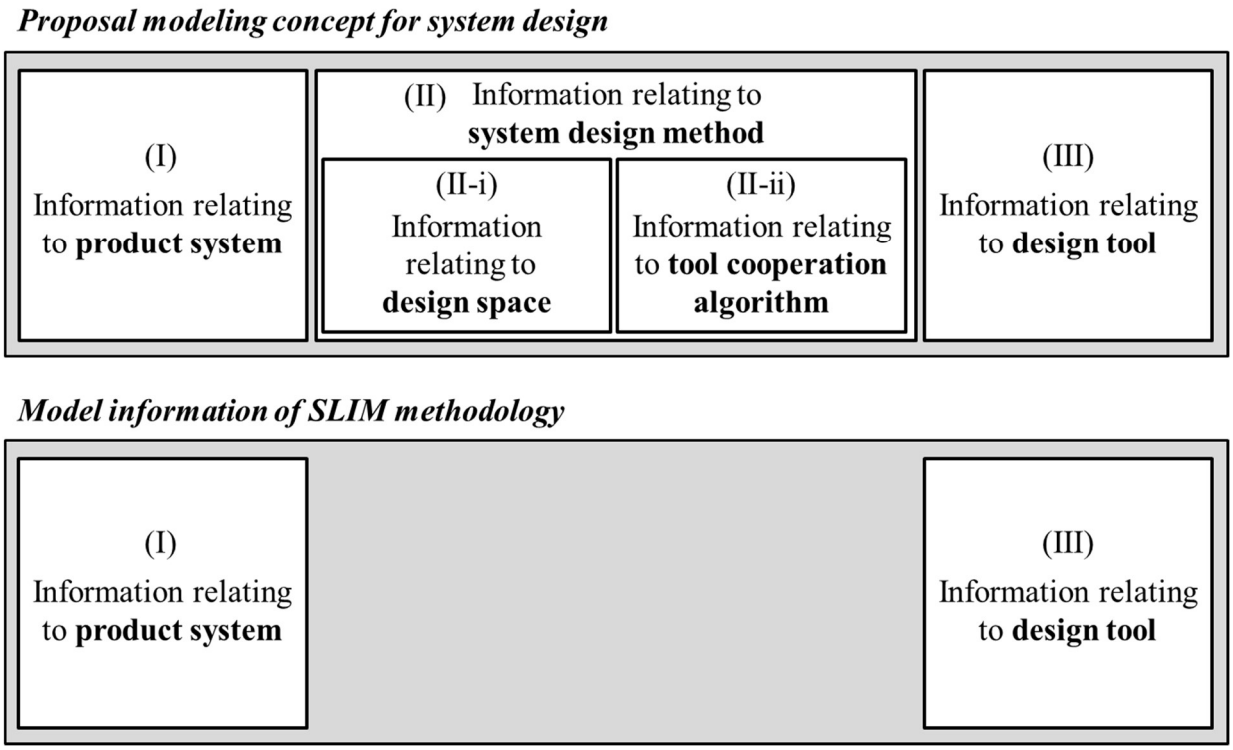


Fig. 2.10　Comparison of information of proposal modeling concept and SLIM methodology.

と推察できる。

以上、SLIM 手法に対して提案したモデリング概念を展開し、理想とするシステムデザインのプロセスが実現できる可能性を示すことができた。

2.3.3　PDI(Product Data Integration)手法で扱う情報との比較

本項では、PDI(Product Data Integration)手法[8)]で扱う情報と、提案した新しいモデリング概念で扱う情報との比較を行う。

PDI 手法とは、製品システムの同じ情報を様々な設計ドメインのモデルに余分に存在させず、モデルおよびツール間の複雑な依存関係を無くすために、中心的な製品システムのモデルを UML(Unified Modeling Language)[9, 10)]を用いて記述し、製品データを統合する手法およびフレームワークである。UML と機械系 CAD モデル(モデリングツール : CATIA(ダッソー・システムズ社製)および SolidWorks(ダッソー・システムズ・ソリッドワークス社製))との連携を行うための、UML で記述したモデルの例を Fig. 2.11 に示す。製品システムの

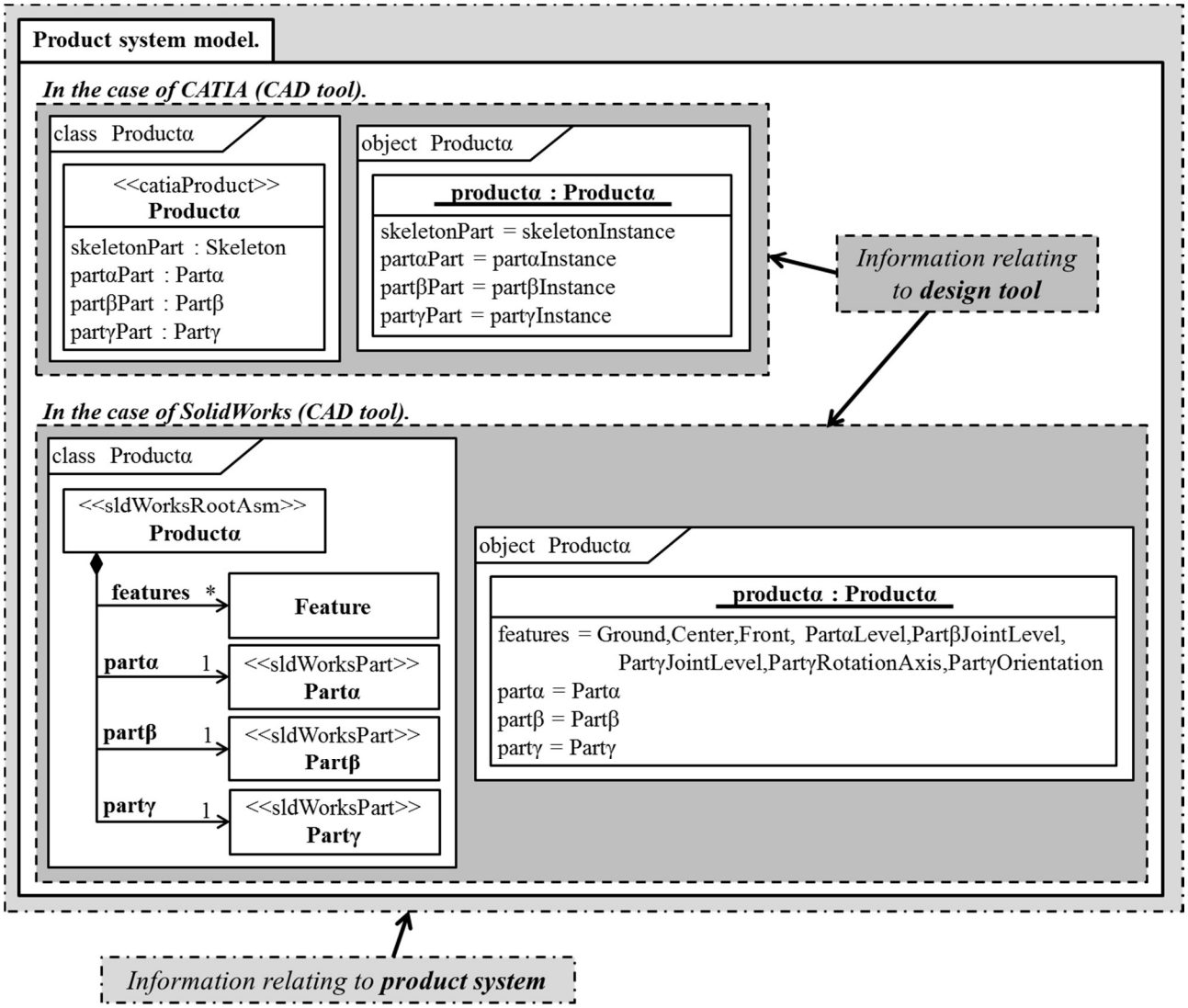


Fig. 2.11　Model example of PDI methodology.

構造は、クラスとしてクラス図で記述する(class Productα)。これは、製品システムに関する情報である。Fig. 2.11 の上側に示す CATIA と連携する場合は、<<catiaProduct>>というステレオタイプを付け、構成要素(Partα、Partβ、Partγ)以外に Skeleton という要素も定義する。クラスに対するインスタンスは、オブジェクト図で記述する(object Productα)。Fig. 2.11 の下側に示す SolidWorks と連携する場合は、<<sldWorksRootAsm>>というステレオタイプを付け、構成要素には<<sldWorksPart>>というステレオタイプを付け記述する。構成要素以外に Feature というクラスも定義する。クラスに対するインスタンスは、オブジェクト図で記述する(object Productα)が、features という属性には、Ground、Center、Front、PartαLevel、

PartβJointLevel、PartγJointLevel、PartγRotationAxis、PartγOrientation といった値を定義する。これらは、各設計ツールに関する情報である。上記の記述方法を用いることで、UML で各設計ツールのモデルが記述でき、製品データ(モデル)を UML で記述した製品システムのモデルに統合することができる。

以上により、PDI 手法で扱う情報は、製品システムに関する情報と設計ツールに関する情報であることが明らかになった。モデル情報としては、製品システムに関する情報に設計ツールに関する情報が内包される形で記述されている。

前節で提案したモデリング概念の情報と PDI 手法で扱う情報との比較を、Fig. 2.12 に示す。提案したモデリング概念の情報のうち、(Ⅰ)製品システムに関する情報と(Ⅲ)各設計ドメインの設計ツールに関する情報は PDI 手法でも扱う。つまり、PDI 手法に対しては、提案したモデリング概念でその情報を満たしている。特に、Fig. 2.11 の例を見ても明らかなように、同じ Productα という製品システムを記述しているが、CAD ツールによって異なるモデルとなっている。つまり、前節でも言及したが、(Ⅲ)の各設計ツールに関する情報はシステムとして統合することはできず、各設計ツールに適した形で情報を扱う必要がある

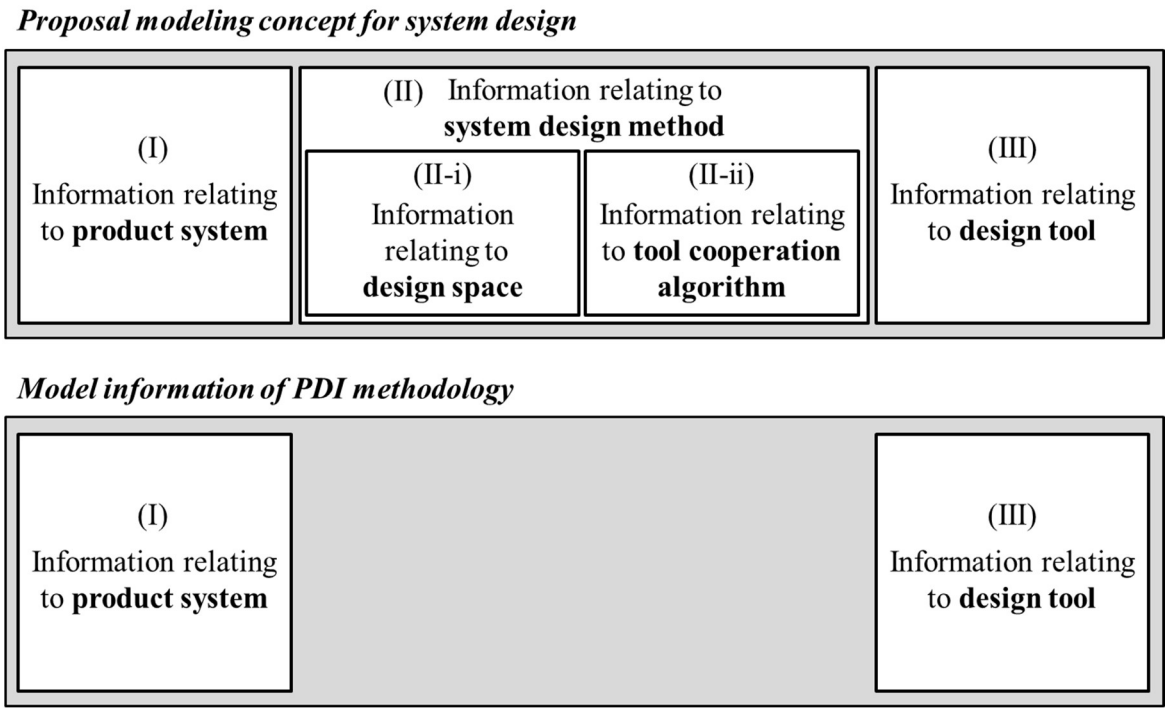


Fig. 2.12 Comparison of information of proposal modeling concept and PDI methodology.

ことを示している。PDI 手法では、(Ⅱ-ⅰ)設計空間に関する情報や(Ⅱ-ⅱ)設計ツール連携のアルゴリズムに関する情報を記述しておらず、理想とするシステムデザインのプロセスのうち、基本設計での適正システム構造の導出が実現できていないことがわかる。これは、SLIM 手法同様に、PDI 手法がデザインされた結果を管理、運用する手法であり、システムデザインの一連のプロセスが考慮されていないためであると推察できる。

以上、PDI 手法に対して提案したモデリング概念を展開し、理想とするシステムデザインのプロセスが実現できる可能性を示すことができた。

2.4　新しいモデリング概念の構築結果と考察

本章では、システムデザインのプロセスを網羅するモデリング手法がなく、一貫したモデルベースのシステムデザインを実現できていない従来技術の課題に対し、モデリング手法のためのモデリング概念の提案と検証を行った。その結果、以下の 4 つの情報を扱い、これらの情報を関係付ける、モデリング概念を構築した。

(I) 製品システムに関する情報：概念設計で導出された要求、機能、振る舞い、理想システム構成に関する情報を含む製品システムに関する情報。

(II) システムデザイン手法に関する情報であり、以下の 2 つの情報を含む。

(II-i) 設計空間に関する情報：システムデザインを行う設計目的や設計意図、つまりどの範囲でどのような設計をするかという設計空間に関する情報。

(II-ii) ツール連携アルゴリズムに関する情報：各設計ドメインで用いる設計ツール間の関係、つまりどのような順番でどのような問題に対しどの設計ツールを用いるのかという、ツール連携のためのアルゴリズムに関する情報。

(III)各設計ツールに関する情報：各設計ドメインで用いる設計ツールに関する情報。

構築したモデリング概念は、現状技術のシステムデザイン手法で扱う情報を網羅し、かつどのような観点で情報を捉えるべきかを明確に定義したものである。具体的には、製品システムに関する情報、基本設計における適正システム構造の導出のための設計空間に関する情報、および基本設計から各詳細設計へと繋がる各設計ツールに関する情報を網羅できた。ツール連携アルゴリズムに関する情報については、この情報を扱う現状技術は無かったが、一貫したモデルベースのシステムデザインには必要な観点である。Fig. 2.13 に示すように、従来のシステムデザイン手法におけるモデリングでは、システムデザインに必要な情報を部分的にはモデリングできるものの、明確な観点の定義がないために、情報の混

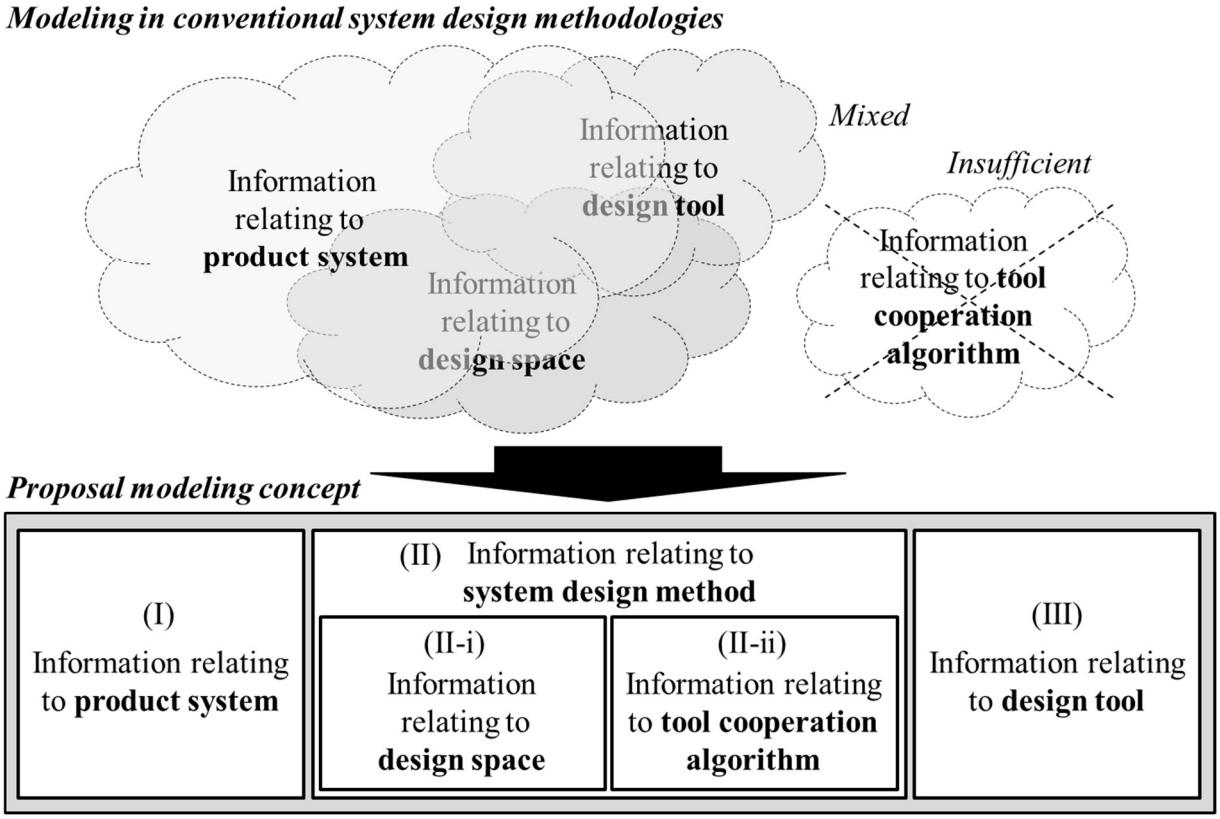


Fig. 2.13　Proposal modeling concept compared with conventional modeling.

在や不足のあるモデルとなっていた。したがって、システムデザインのプロセスを通して一貫したモデリングができず、また異なる観点の情報が混在していることで、モデルの再利用が難しいという課題が生じていた。これに対し、本モデリング概念は、情報を捉える観点を明確に定義し、整理することができた。これらの観点に従うことで、情報の混在や不足の無いモデリングが可能である。したがって、一貫したモデルベースのシステムデザインが可能となり、モデルの再利用性も見込まれる。

構築したモデリング概念と第 1 章で述べたシステムデザインのプロセスとの関係を、Fig. 2.14 に示す。従来のモデリング手法では、システムデザインのプロセスのうち、概念設計および基本設計までの一貫したモデリングであり、各詳細設計ドメインへの繋がりまで考慮したモデリングとはなっていないという課題があった。その課題に対して、Fig. 2.14 に示すように、構築したモデリング概念を用いることで、概念設計、基本設計、および基本設計から詳細設計への連携が可能なモデリング手法を実現することが可能である。

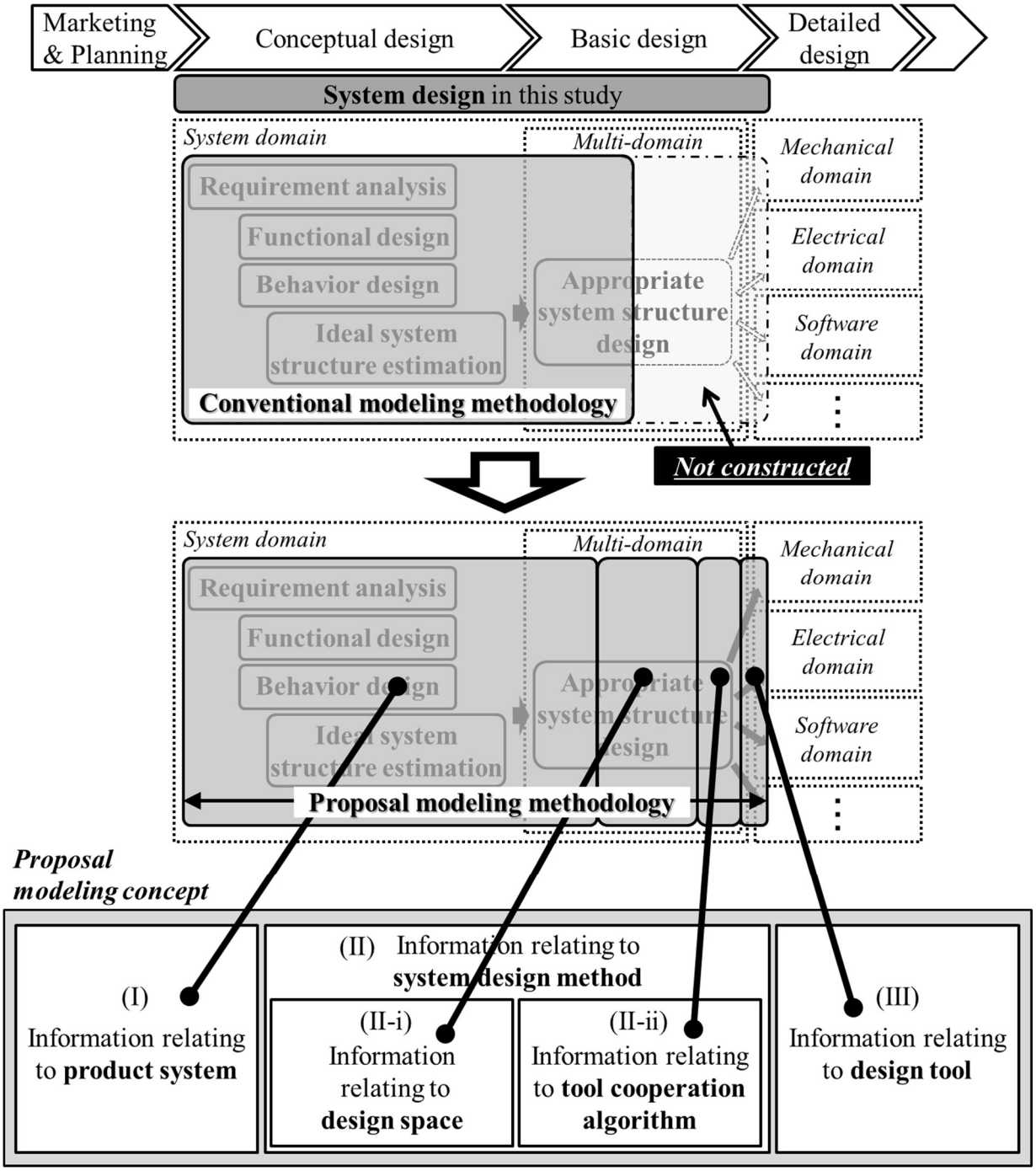


Fig. 2.14　Summary of proposal modeling concept.

このようにして、モデリング手法の基となるモデリング概念が構築されたので、次章では、モデル記述方法を検討し、一貫したモデルベースのシステムデザインが可能なモデリング手法を構築する。

2.5　結言

一貫したモデルベースのシステムデザインを実現するモデリング手法を構築するために、モデリングに必要な情報を抽出、整理し、モデリング概念を検討した。以下に、結論を述べる。

1. 基本設計および詳細設計に繋がる部分に関して、モデリング概念が構築されていないという課題に対して、マルチドメインに関するデザインという観点に着目し、単一設計ドメインからマルチドメインに展開、システム的な観点で整理することで、モデリングに必要な情報が抽出、整理された。
2. さらに、モデリング概念として、次の 4 つの観点とそれらの関係で情報を捉える概念が構築された。4 つの観点で見た情報とは、製品システムに関する情報、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報、各設計ツールに関する情報である。
3. 構築されたモデリング概念は、従来技術のモデリング概念を包含しており、かつ、新たな観点が加えられたことで、一貫したモデルベースのシステムデザインを支援できるものである。

本章では、システムデザインのための新たなモデリング概念を構築した。次章では、本章で構築したモデリング概念を用いて、モデル記述方法を検討し、モデリング手法を構築した結果を述べる。

参考文献

1) Nam P. Suh, “設計の原理－創造的機械設計論－”，朝倉書店，(1992).
2) 赤木新介,“システム工学　エンジニアリングシステムの解析と計画”, 共立出版, (1992).
3) 大富浩一，“よくわかる「設計手法」活用入門”，日刊工業新聞社，(2016).
4) 村田秀則，岩田剛治，佐藤了平，森永英二，岡本和也，青山和浩，古賀毅，“システム定義手法を用いたシステムデザインにおける自動最適化アルゴリズムに関する研究”，スマートプロセス学会誌，Vol. 3，No. 1 (2014) 67-75.
5) OMG (Object Management Group)，“OMG Systems Modeling Language, Version 1.3”，http://www.omg.org/spec/SysML/1.3/PDF，(2012).
6) Sanford Friedenthal，Alan Moore，Rick Steiner，“A Practical Guide to SysML”，Morgan Kaufmann，(2009).
7) Manas Bajaj，Dirk Zwemer，Russell Peak，Alex Phung，Andrew Scott，Miyako Wilson，“Satellites to Supply Chains, Energy to Finance － SLIM for Model-Based Systems Engineering”，2011 INCOSE International Symposium，(2011).
8) Axel Reichwein，“Application-specific UML Profiles for Multidisciplinary Product Data Integration”，Universität Stuttgart，(2011).
9) OMG (Object Management Group)，“OMG Unified Modeling Language, Infrastructure, Version 2.2”，http://www.omg.org/spec/UML/2.2/Infrastructure/PDF，(2009).
10) OMG (Object Management Group)，“OMG Unified Modeling Language, Superstructure, Version 2.2”，http://www.omg.org/spec/UML/2.2/Superstructure/PDF，(2009).

第 3 章　モデル記述方法の構築と実装

3.1　緒言

第 2 章では、モデリング手法に必要なモデリング概念が構築された。システムデザインのためにモデリングすべき情報は、製品システムに関する情報、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報、各設計ツールに関する情報である。モデリング手法を構築するためには､モデリング概念に合わせてモデル記述方法も定義する必要がある。そこで本章では、モデリング概念に従い、モデルとして記述するためのモデル記述方法を検討し、モデリング手法を構築した。以下に、その結果を述べる。

3.2　モデル記述方法の現状と課題

まずモデル記述方法を定義するために、現状のモデル記述方法について整理し、課題を明らかにする。2 章で提案したモデリング概念およびその検討内容に基づき、各情報に必要な定義内容を大まかに整理すると、モデル記述方法には以下の 8 つの定義を行うことができる必要がある。全体像を Fig. 3.1 に示す。

I.　製品システムに関して：

① 要求定義：対象とする製品システムの範囲、ユーザ要求、製品システムとして満たすべき詳細な要求の定義

② 機能、振る舞い定義：要求を満たすために製品システムが実現すべき機能、振る舞いの定義

③ 理想システム構成の定義:要求を満たす機能､振る舞いを実現するハードウェア、ソフトウェアを含めた理想的なシステム構成の定義

④ 理想システム構成に係る制約関係の定義：一般的な物理式、経済式など理想システム構成に関係する制約式、制約関係の定義

II.　システムデザイン手法に関して：

II-i.　設計空間に関して：

⑤ 設計空間に係る要求定義：設計目的や設計意図の根拠となる要求の定義

⑥ 設計空間の定義：設計目的や設計意図によって決められた構造や制約式、制約関係など設計を行う条件である設計空間の定義

II-ii.　ツール連携アルゴリズムに関して：

⑦ ツール連携アルゴリズムの定義:どのような問題に対し､どのような順番で、

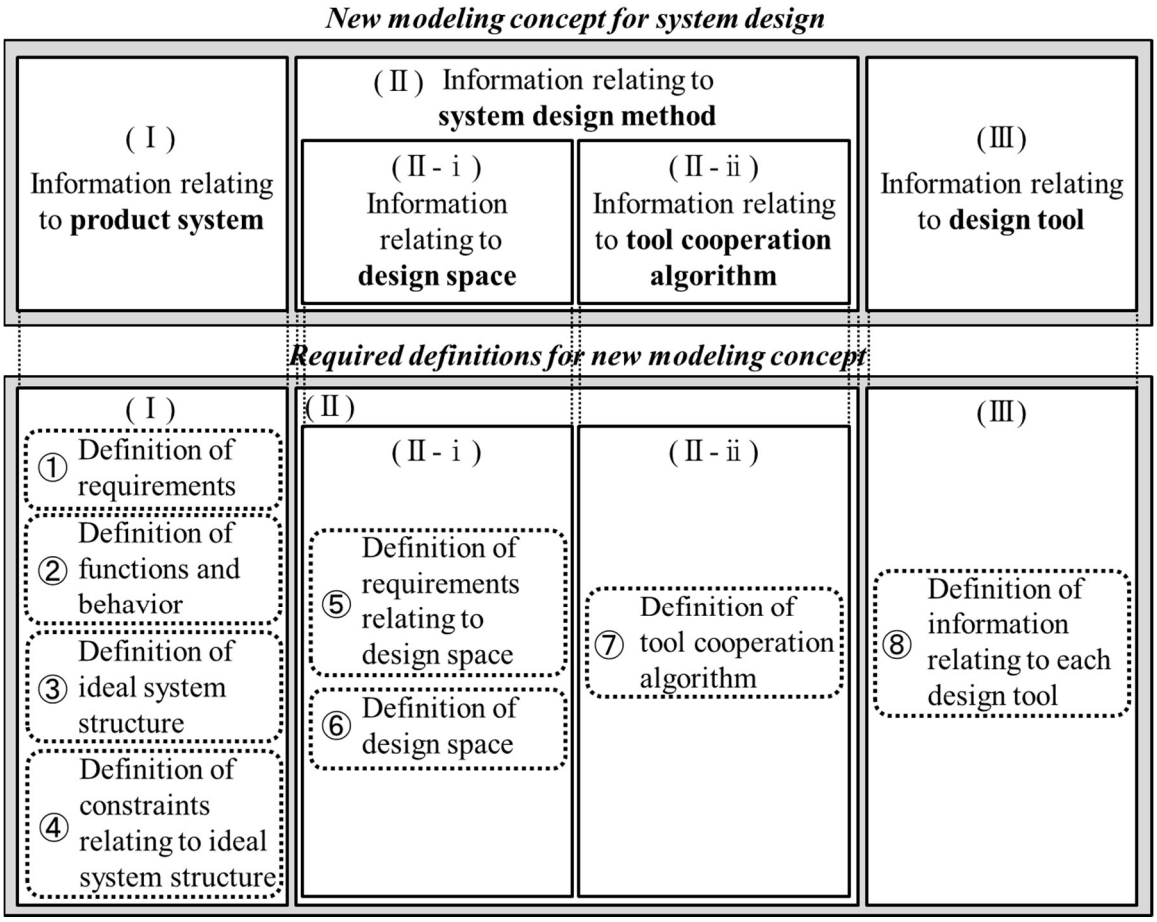


Fig. 3.1　Requirement for new model description method.

どの設計ツールを用いるかという各設計ツールを繋ぐアルゴリズムの定義

III. 各設計ツールに関して：

⑧ 各設計ツール用の情報定義 : 各設計ツールと連携するための各設計ツールに依存した情報の定義

これに対して、現状のモデル記述方法を整理する。第 1 章でも触れたが、システム的な観点でのモデル記述方法としては、SysML[1)]、IDEF[2)]、FBS モデラ [3)]、1D-CAE の Modelica[4)] が挙げられる。以下に、それぞれの特徴を述べる。

- SysML

SysML[1)]は、システムを定義、分析、設計および検証するための汎用的な図式モデリング言語であり、モデル化に必要な意味的基盤とその図式表現を定義している。SysML の仕

様の策定、配布は、標準化団体 OMG(Object Management Group)が行っている。SysML は、ソフトウェア分野で発展したモデリング言語である UML[5-7]を基本としながら、システムの表記に適すよう図の削除、変更、追加を行っており、9 種類の図で構成される。SysML の全体像を Fig. 3.2 に示す。要求図(Requirement diagram)では、機能要求、非機能要求を含めたシステムへの全ての要求を記述し、要求のトレーサビリティをサポートする。振る舞いに関しては、ユースケース図(Use case diagram)、アクティビティ図(Activity diagram)、シーケンス図(Sequence diagram)、ステートマシン図(State machine diagram)の 4 つの図が用意されている。ユースケース図(Use case diagram)では、システムが外部に提供する機能を記述する。アクティビティ図(Activity diagram)では、機能を実現するための処理の流れを記述する。シーケンス図(Sequence diagram)では、システム内の相互作用を記述する。ステートマシン図(State machine diagram)では、要素の状態とその遷移を記述する。構造に関しては、パッケージ図(Package diagram)、ブロック定義図(Block definition diagram)、内部ブロック図(Internal block diagram)、パラメトリック図(Parametric diagram)の 4 つの図が用意されている。パッケージ図(Package diagram)では、モデルの構成要素を整理して記述する。ブロック定義図(Block definition diagram)では、システムの構造を記述する。内部ブロック図(Internal block diagram)では、システム要素の内部構造、要素間のやり取りを記述する。パラメトリック図(Parametric diagram)では、システムの制約関係を記述する。SysML の 4 つの柱である要求、構造、振る舞い、パラメトリックに関して、SysML で記述したモデル例を Fig. 3.3 に示す。

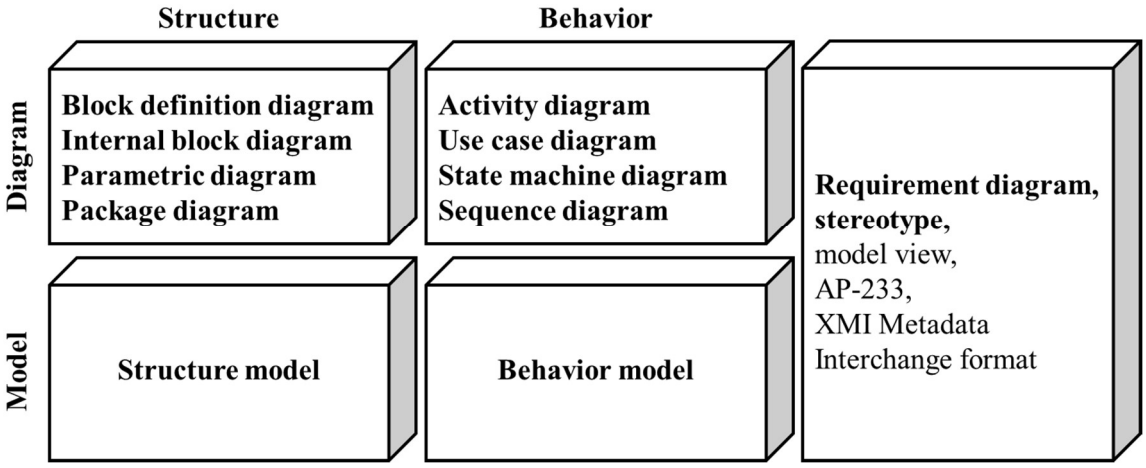


Fig. 3.2 The structure of SysML[8].

前述の通り、SysML はシステムの記述に適しており、製品システムの設計、開発に適用されている[10, 11]。本研究で構築したモデリング概念と照らし合わせると、①要求定義は要求図、②機能、振る舞い定義はユースケース図、アクティビティ図、シーケンス図、ステートマシン図、③理想システム構成の定義はブロック定義図、内部ブロック図、④理想システム構成に係る制約関係の定義はパラメトリック図で記述できると考えられる。また、⑤設計空間に係る要求定義は要求図、⑦ツール連携アルゴリズムの定義はアクティビティ図等を用いて記述できるのではないかと考えられる。

さらに SysML には、必要に応じてモデルの意味や表現を拡張するための機能が備わっている。この機能は、ステレオタイプ、および一連のステレオタイプをまとめたプロファイルを定義することで、SysML に新たな概念を加え、拡張することができるものである[12]。SysML を拡張した例として、SysML と Modelica を連携させるために OMG により定義され

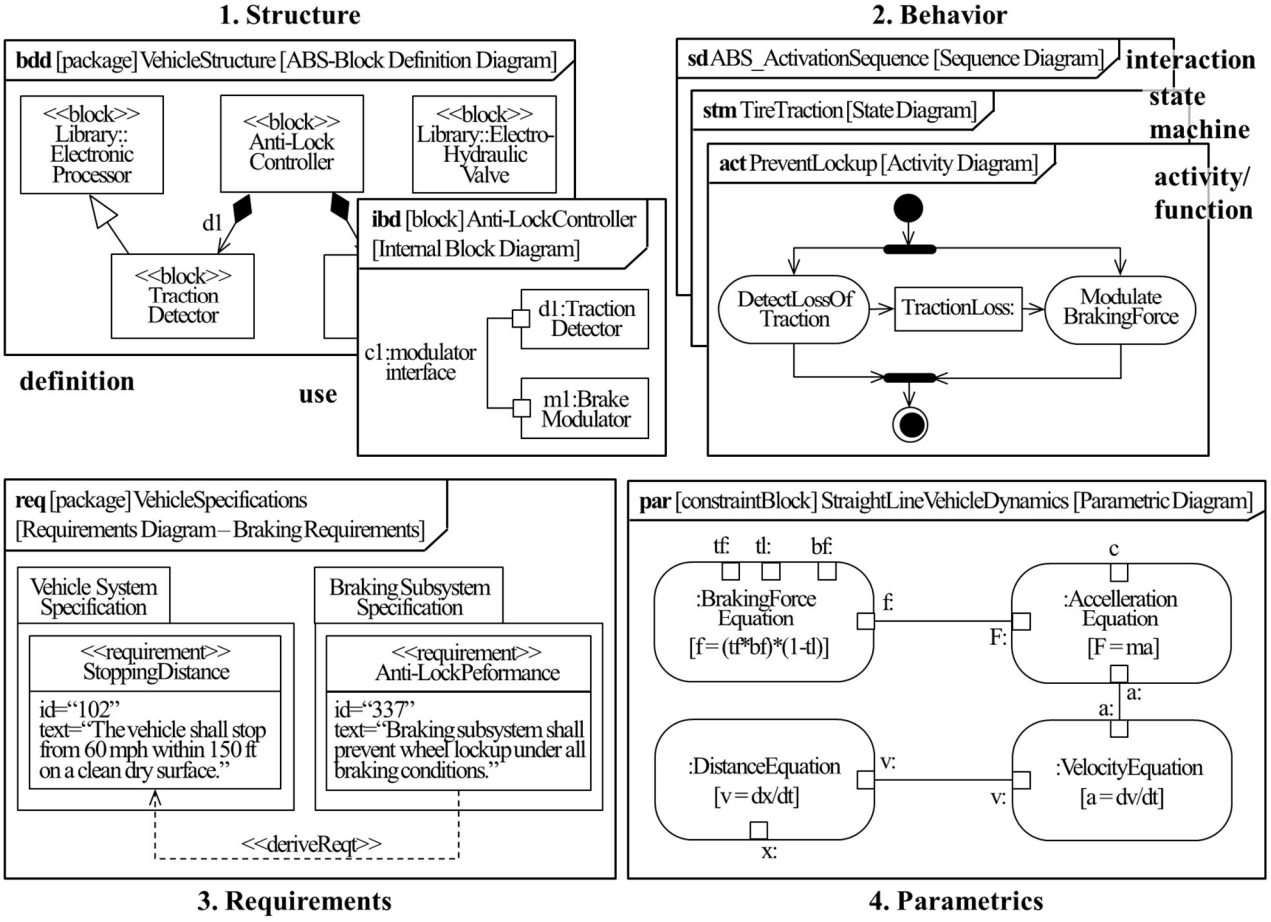


Fig. 3.3　The Four Pillars of OMG SysML[9].

たステレオタイプの一例を、Fig. 3.4 に示す[13, 14]。また、第 2 章で挙げた現状のシステムデザイン手法のうち、SDSI-Cubic 手法[15]では最適化問題の情報を、PDI 手法[16]では各設計ツールの情報を記述するために、それぞれステレオタイプを追加している。したがって、⑥設計空間の定義、⑧各設計ツール用の情報定義は、ステレオタイプを定義することで、拡張した SysML を用いて記述できるのではないかと考えられる。

以上、Fig. 3.5 に示すように、SysML を用いることで、本研究のモデル記述方法に対する全ての要求に関して、満たす、もしくは満たす可能性があることが明らかになった。

- IDEF

IDEF[2]は、システムやソフトウェアを対象として、機能や情報(データ)などの分析と設計のためのモデリング言語、およびその方法論である。米国空軍の ICAM(Integrated Computer-Aided Manufacturing)プログラムで開発された手法が基となっており、KBSI(Knowledge Based Systems Inc.)によって、開発、維持されている。その開発背景から、ビジネスプロセスの分析、モデリングでも広く利用されている[17, 18]。IDEF は、Table 3.1 に示すように、IDEF0 から IDEF14 まであり、モデリングする目的に応じて各手法を適用

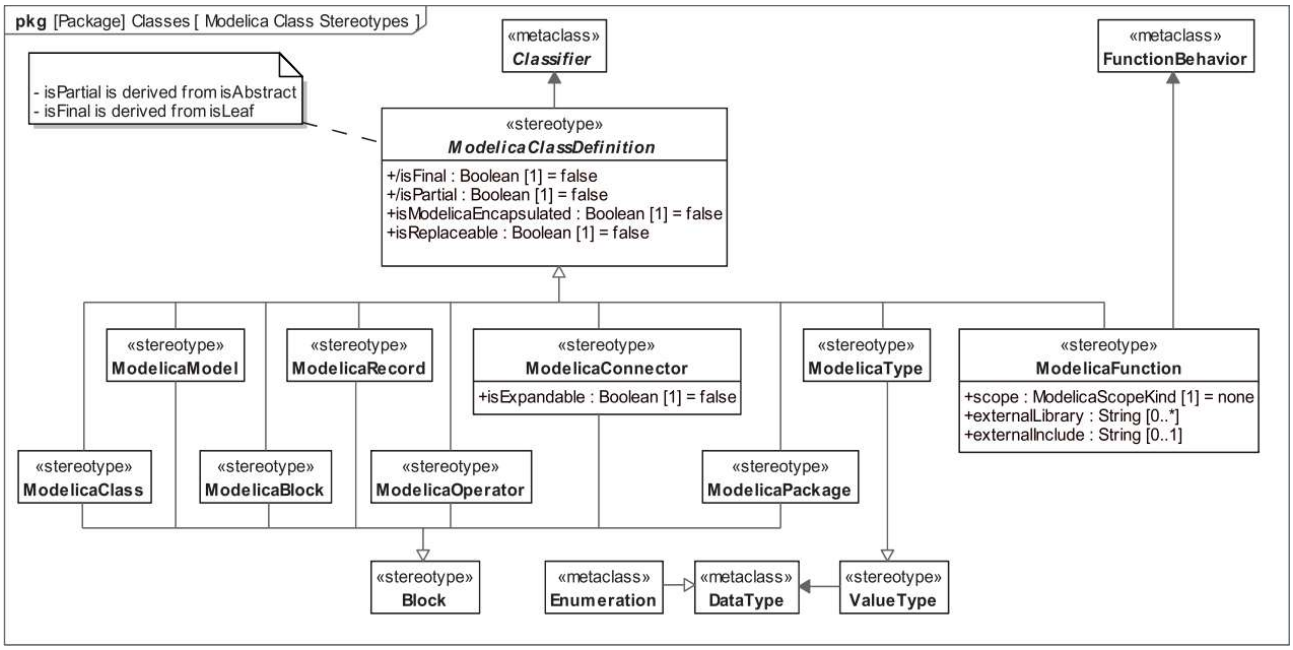


Fig. 3.4　Example of the stereotypes for Modelica Classes[13].

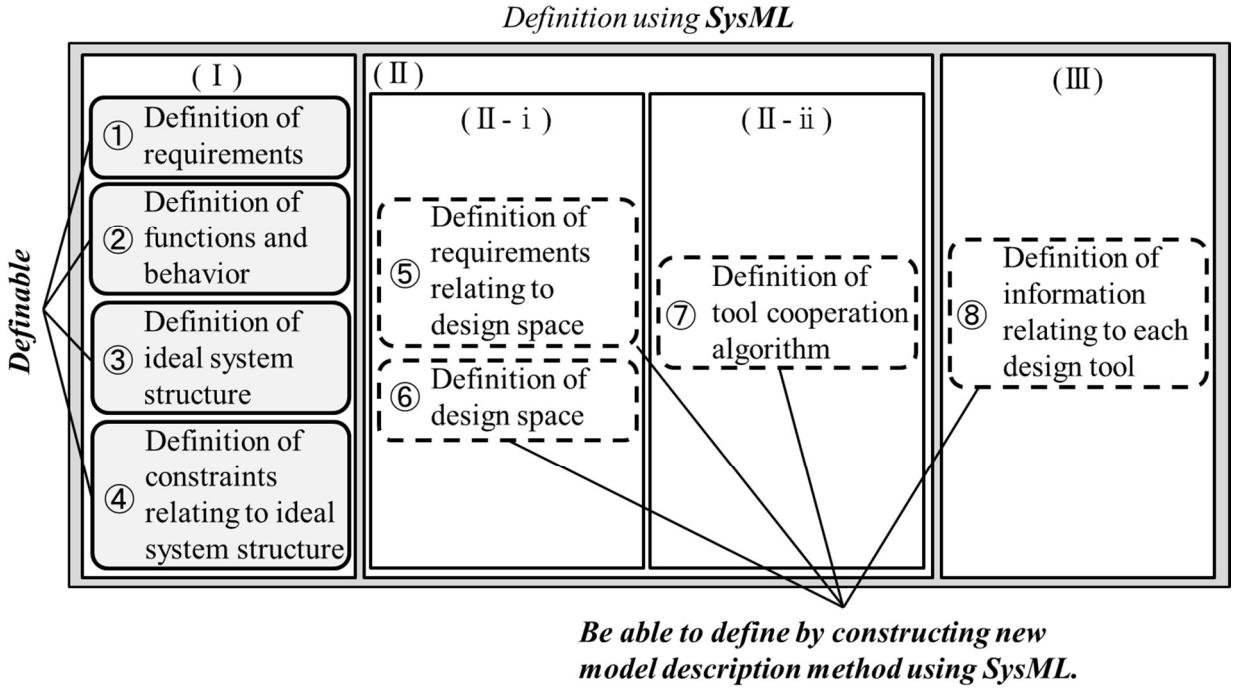


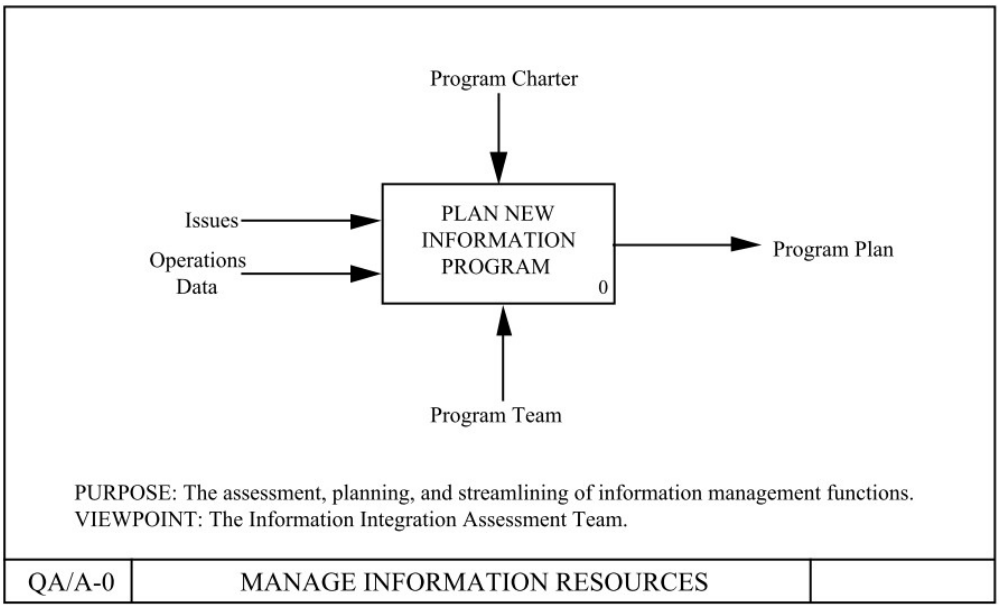
Fig. 3.5 Summary of SysML for new model description method.

Table 3.1 IDEF family[17].

	Outline
IDEF0	Function Activity Modeling
IDEF1	Information Modeling
IDEF1X	Data Modeling
IDEF2	Dynamic Modeling
IDEF3	Process Description Capture
IDEF4	Object Oriented Design
IDEF5	Ontology Description Capture
IDEF6	Design Rational Capture
IDEF7	Information System Audit Method
IDEF8	Human-System Interaction Modeling
IDEF9	Business-Constraint Discovery Method
IDEF10	Implementation Architecture Modeling
IDEF11	Information Artifact Modeling
IDEF12	Organization Design Method
IDEF13	3-Schema Architecture Design Method
IDEF14	Network/Distribution Design Method

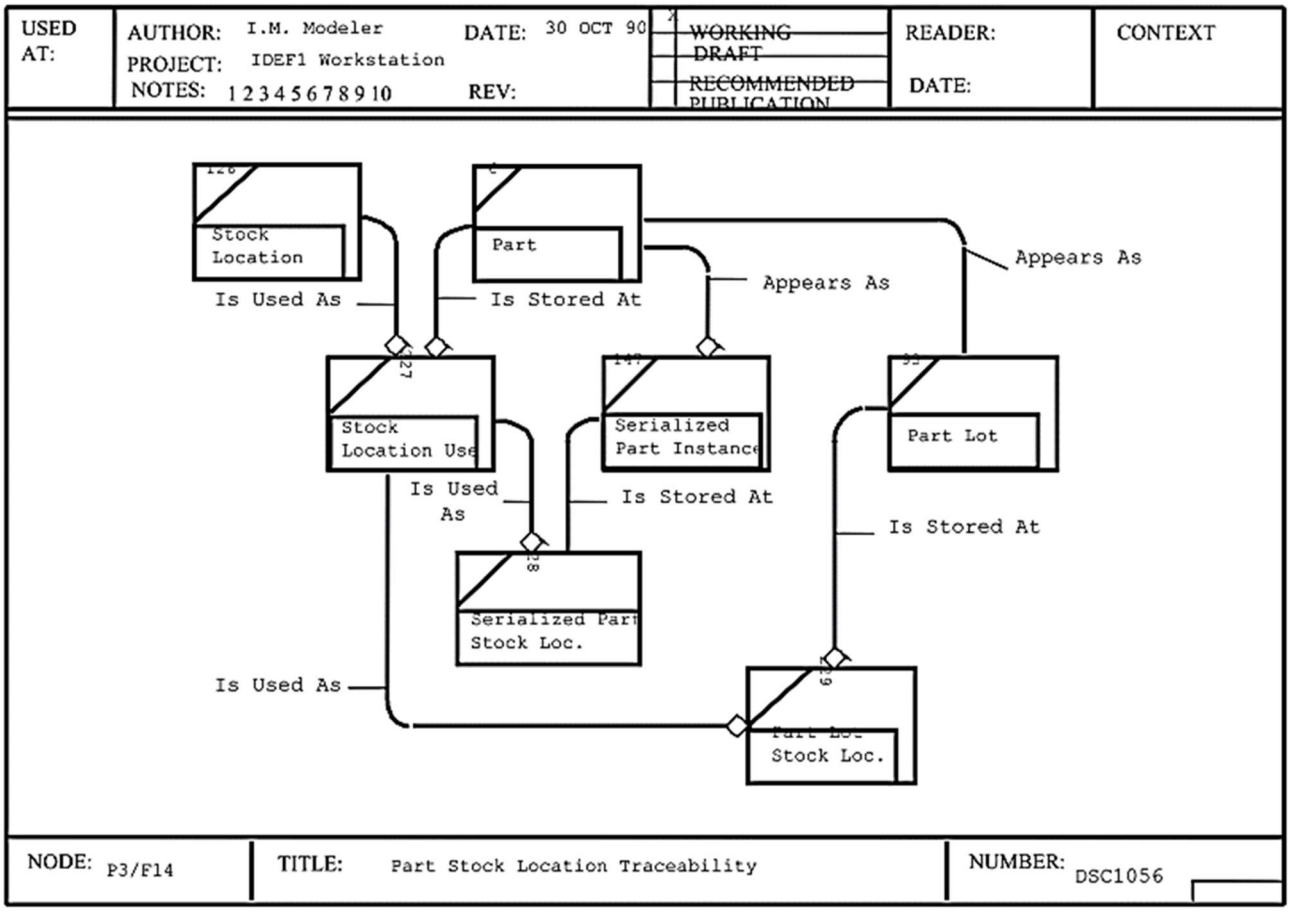
する。開発途中の手法もあるため、主には IDEF0、IDEF1、IDEF3 が利用されている。IDEF0 は、機能のモデリングであり、機能や動作とそれに関係する入力、制約条件、出力、資源や設備を、階層的に詳細化し記述する。IDEF1 は、情報構造のモデリングであり、要素および要素間の関係を記述する。IDEF1X は、リレーショナルデータベースの論理設計のために IDEF1 を拡張したものである。IDEF3 は、プロセスのモデリングであり、時間的なフローを記述する。IDEF2 は力学モデリング、IDEF4 はオブジェクト指向設計手法、IDEF5 はオントロジ記述獲得手法、IDEF6 は設計根拠獲得手法、IDEF7 は情報システム検査手法、IDEF8 はユーザインタフェースモデリング、IDEF9 は事業制約発見手法、IDEF10 は実装アーキテクチャモデリング、IDEF11 は情報人工物モデリング、IDEF12 は組織設計手法、IDEF13 は 3 スキーマアーキテクチャ設計手法、IDEF14 はネットワーク/流通設計手法である。IDEF0、IDEF1、IDEF3 で記述したモデル例を Fig. 3.6 に示す。

本研究で構築したモデリング概念と照らし合わせると、②機能、振る舞い定義は IDEF0、IDEF3、③理想システム構成の定義は IDEF1 で記述できると考えられる。しかし、①要求定義、④理想システム構成に係る制約関係の定義、⑤設計空間に係る要求定義、⑥設計空間の定義、⑦ツール連携アルゴリズムの定義、⑧各設計ツール用の情報定義については、IDEF では記述することができない。以上、Fig. 3.7 に示すように、IDEF について、本研究のモデル記述方法への適用可能性を整理することができた。

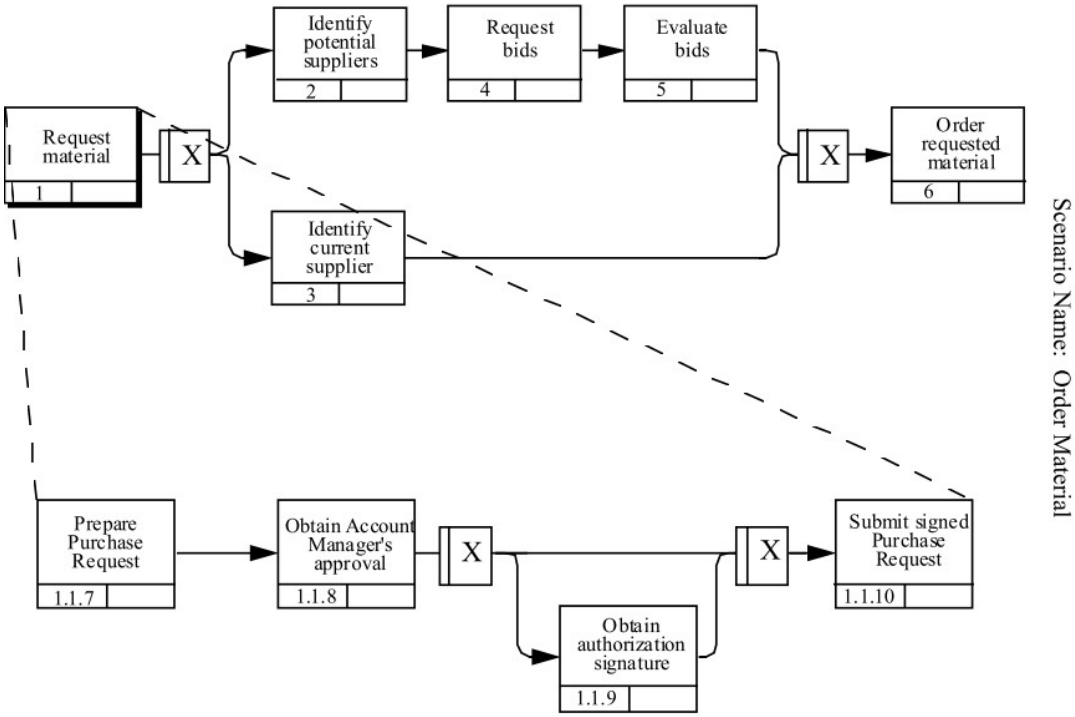


(a) Example of IDEF0[19].

Fig. 3.6 Example model of IDEF.



(b) Example of IDEF1[20].



(c) Example of IDEF3[21].

Fig. 3.6 Continued.

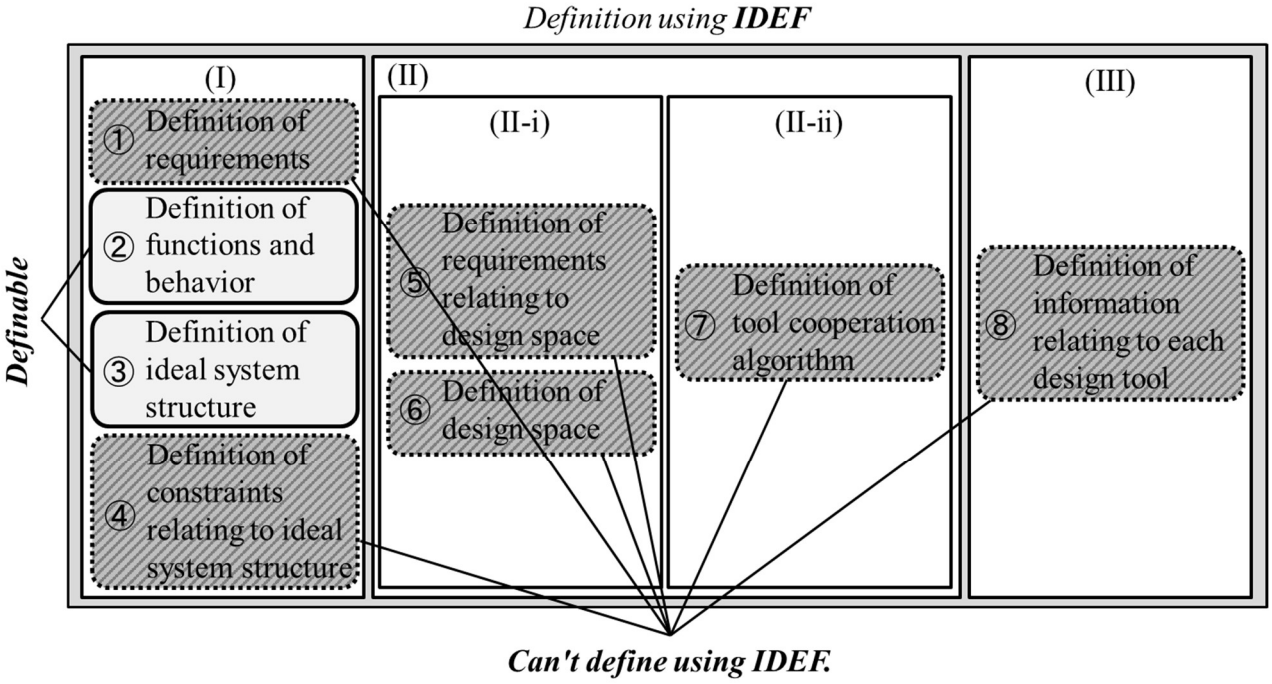


Fig. 3.7　Summary of IDEF for new model description method.

- FBS モデラ

FBS モデラ [3)]は、機能設計を支援するための方法論である FBS モデリングに基づき実装された、モデル記述方法含むツールである。FBS モデラでは、機能、振る舞い、状態、およびそれらの関係を定式化し、機能をコンピュータ上で扱う。機能については、その動詞に当たる情報を機能ノード(function node)、その目的語に当たる情報を目的語ノード(object node)とし、その組みにより表現する。振る舞いについては、実体(entity)、実体間の関係(relation)、および物理現象(physical phenomenon)のネットワークで表現し、それらを総称して挙動ノード(behavior node)と呼ぶ。FBS モデラを用いることで、機能分解や機能の実現性を検証することができる。

本研究で構築したモデリング概念と照らし合わせると、②機能、振る舞い定義は FBS モデラで記述できると考えられる。しかし、①要求定義、③理想システム構成の定義、④理想システム構成に係る制約関係の定義、⑤設計空間に係る要求定義、⑥設計空間の定義、⑦ツール連携アルゴリズムの定義、⑧各設計ツール用の情報定義については、FBS モデラでは記述することができない。以上、Fig. 3.8 に示すように、FBS モデラについて、本研究のモデル記述方法への適用可能性を整理することができた。

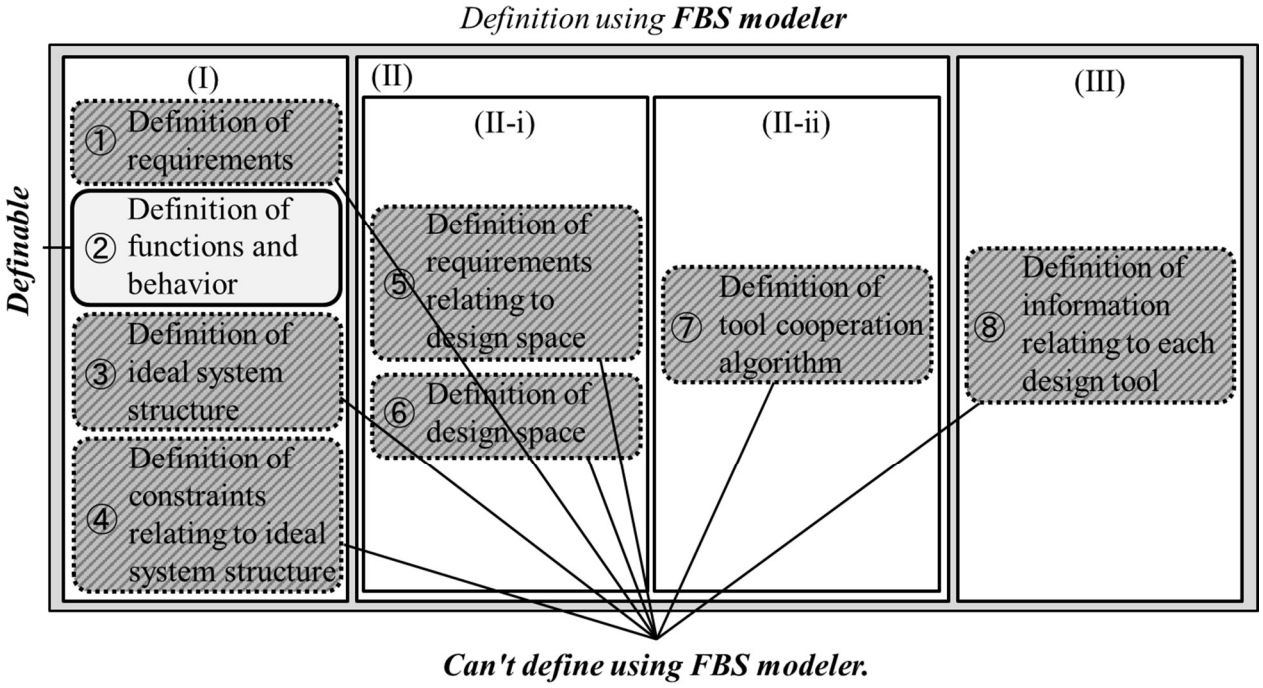


Fig. 3.8　Summary of FBS modeler for new model description method.

- Modelica

Modelica[4)]は、システムの動的な挙動を定義、設計、評価および検証するための汎用的なモデリング言語である。Modelica の仕様の策定、配布は、非営利団体 Modelica Association が行っている。Modelica では、微分、代数、離散方程式で表現できる物理現象に着目し、式とその関係により、システムの制約関係をグラフィカルに表現する。したがって、機械、電気、流体、熱などに関する様々な物理現象をシステムとして統合して扱うことができ、マルチドメインに跨るモデリングが可能である。その特徴から、自動車、エネルギー、電気機械など様々な分野で利用されている [22)]。Modelica で記述したモデル例を、Fig. 3.9 に示す。

本研究で構築したモデリング概念と照らし合わせ、物理的な側面で見ると、④理想システム構成に係る制約関係の定義は Modelica で記述できると考えられる。また、関係するパラメータやその条件をモデル内に記述するという点で、⑥設計空間の定義の一部も同時に行われると考えられる。しかし、物理的な本質を持たないソフトウェアを含めたシステムに係る全ての制約関係は記述できず、また、設計空間の定義を明確に記述することもでき

ない。さらに、①要求定義、②機能、振る舞い定義、③理想システム構成の定義、⑤設計空間に係る要求定義、⑦ツール連携アルゴリズムの定義、⑧各設計ツール用の情報定義についても、記述することができない。以上、Fig. 3.10 に示すように、Modelica について、本研究のモデル記述方法への適用可能性を整理することができた。

以上、現状のモデル記述方法である SysML、IDEF、FBS モデラ、Modelica について、それらの特徴を整理した。その結果を踏まえ、本研究では、SysML をベースとしたモデル記述方法を構築することとする。しかし前述の通り、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報、各設計ツールに関する情報については、それらのプロファイルを定義する必要がある。そこで、モデル記述方法の構築と実装に向けて、次節では、システムデザイン手法および設計ツールを決定し、各プロファイルを定義する。

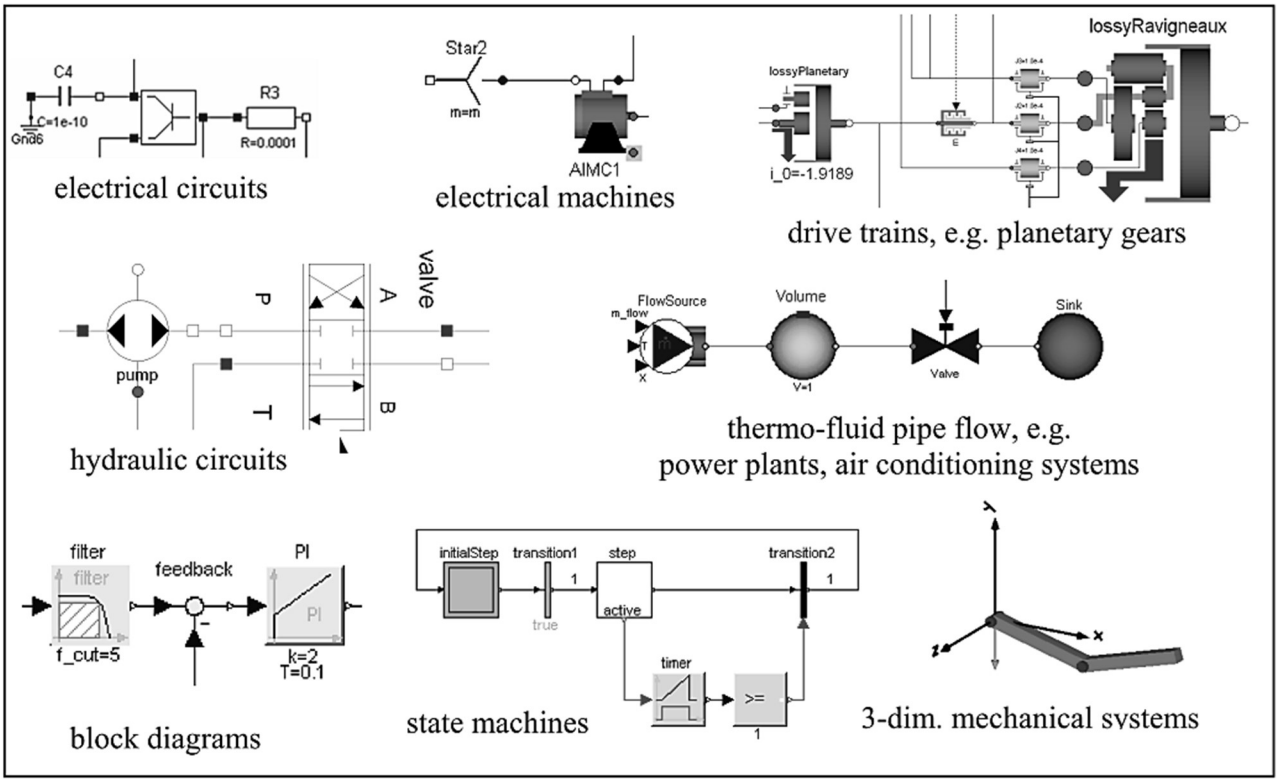


Fig. 3.9　Example model of Modelica[4)].

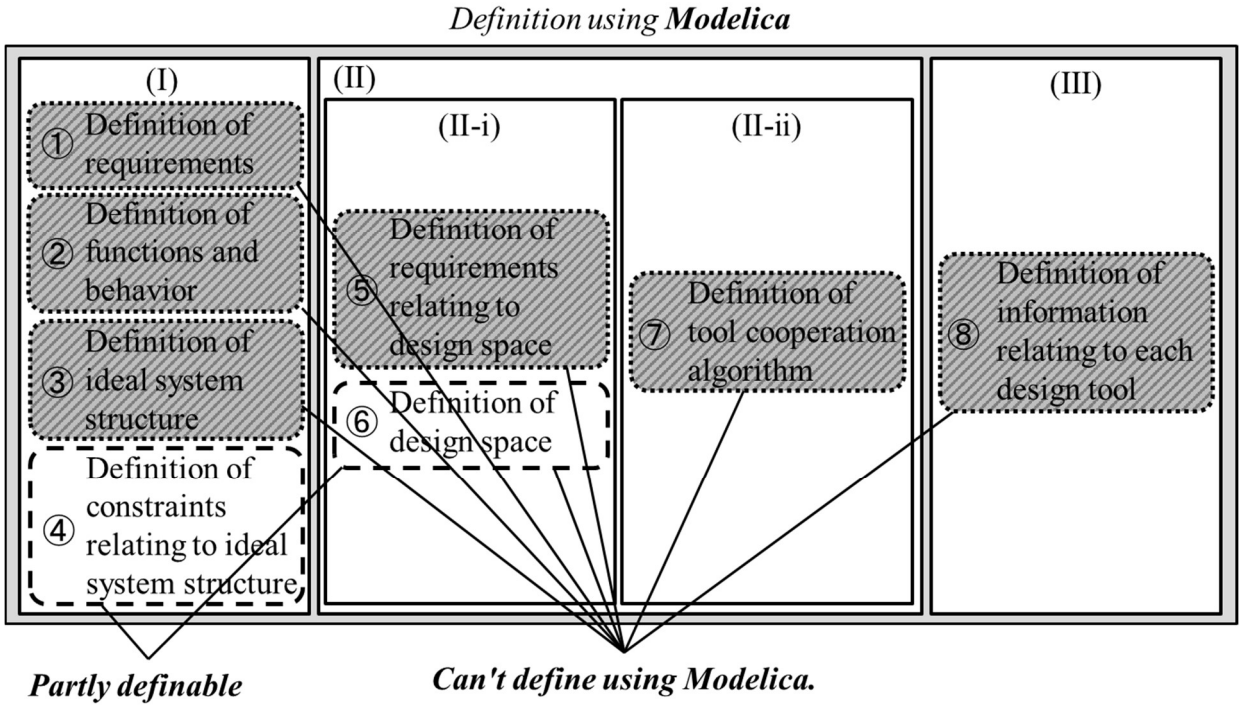


Fig. 3.10　Summary of Modelica for new model description method.

3.3　SysML を用いたモデル記述方法の構築と実装

3.3.1　実装に向けたモデル記述方法の全体像の構築

本研究では、第 2 章で構築したモデリング概念に対し、SysML を用いてモデル記述方法を構築し、モデリングシステムへと実装を行う。そこでまず、モデリング概念で挙げた、製品システムに関する情報、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報を含むシステムデザイン手法に関する情報、各設計ツールに関する情報を、それぞれ独立したモデルとし、それらのモデルを関連づけることで、システムデザインのためのモデルを記述することとする。製品システムは対象が決まれば変わらないが、それ以外のモデルは、各システムデザイン手法や各設計ツールに依存する形で固有の情報を表現したものである。そこで本研究では、以下のように定義し、SysML のパッケージ図を用いて記述した全体像を Fig. 3.11 に示す。

- 製品システムモデル(Product system model)：製品システムに関する情報を表現したもの。
- システムデザイン手法固有モデル(Specific model of system design methodology)：システムデザイン手法に関する情報を表現したもので、以下の設計空間固有モデルと

ツール連携アルゴリズム固有モデルを含む。

- 設計空間固有モデル(Specific model of design space)：設計空間に関する情報を表現したもの。
- ツール連携アルゴリズム固有モデル(Specific model of tool cooperation algorithm)：ツール連携アルゴリズムに関する情報を表現したもの。

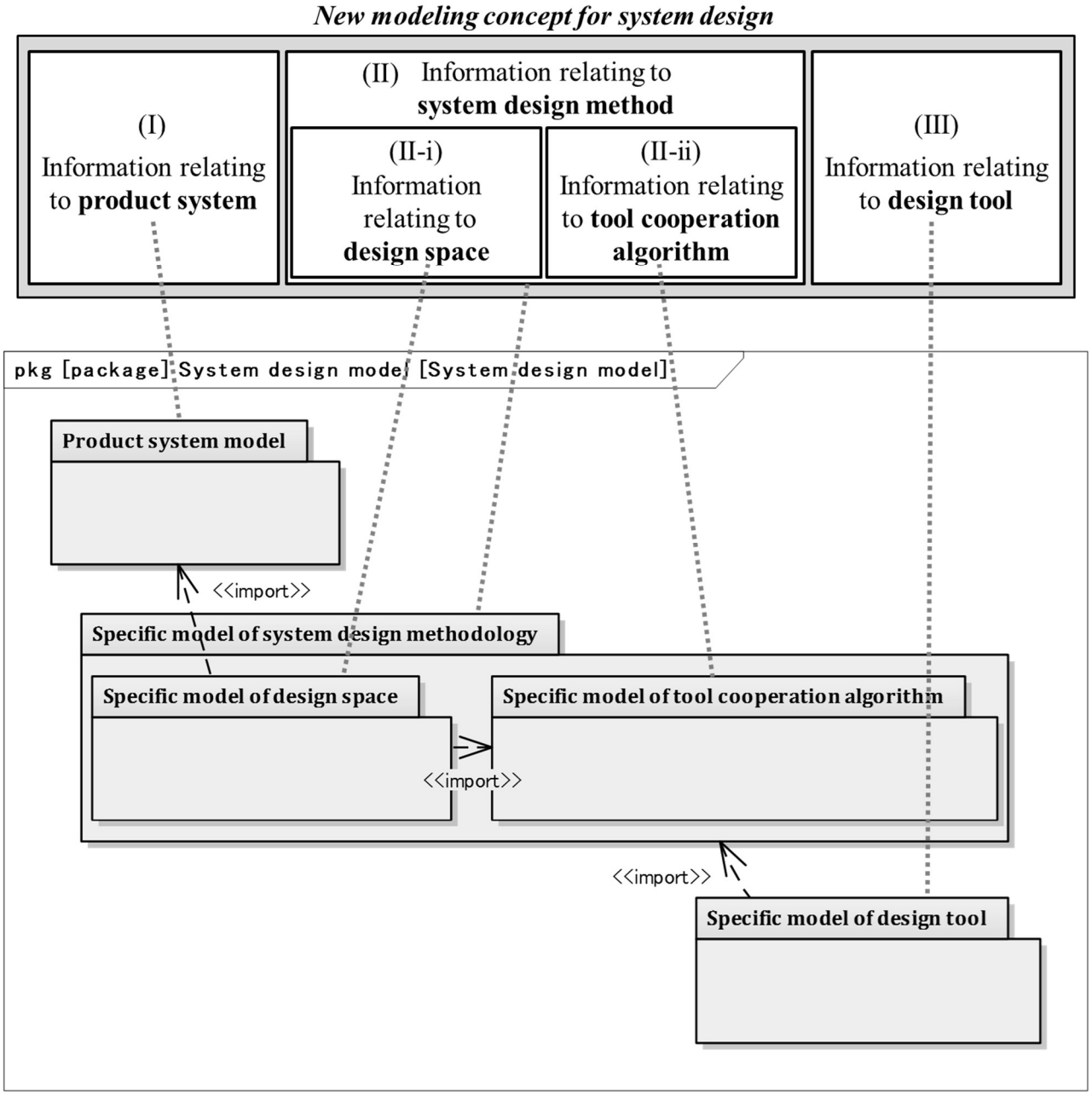


Fig. 3.11　Entire model for system design.

- 設計ツール固有モデル(Specific model of design tool)：設計ツールに関する情報を表現したもの。

次に、実行可能なモデル記述方法とするために、プロファイルを定義するシステムデザイン手法および設計ツールを選択する。

まずシステムデザイン手法について検討する。第 2 章で挙げたが、現状技術として様々なアプローチからシステムデザイン手法が提案されている。本研究では、システムデザインのプロセスの中に、適正システム構造の設計を考慮している。これは、製品システムを実現し価値を最大化する適正な設計解の導出を行うということである。この要求に対し、最適化手法を用いたアプローチが有効である[23)]。性能やコストといった要求を目的関数で表現し、設計案を設計変数で表現することで、目的関数により表現された価値を最大化する適正解を求めることができる。そこで本研究では、基本設計段階で効率的に最適化設計が可能なシステムデザイン手法である SDSI-Cubic 手法[15)]を応用する。

SDSI-Cubic 手法[15)]では、製品システムのモデリング、設計タスク抽出、評価手法構築、設計ワークフロー構築、最適化実行という 5 つの機能を連携し、適正解の導出を行う。マルチドメインに跨る複雑な依存関係を解きほぐし、適正な分割、設計順序の構築を行うことで、効率良く最適化が可能であるという特徴を持つ。またその実行フレームワークは、汎用性、拡張性を考慮して構築されているため、本研究で構築するモデリング手法を適用し、実行することが可能であると考えられる。したがって本研究では、設計空間固有モデルには最適化問題のモデル、ツール連携アルゴリズム固有モデルには SDSI-Cubic 手法のアルゴリズムに沿って各ツールを連携するためのモデルを記述する。

次に設計ツールについて検討する。本研究で目指す一貫したモデルベースのシステムデザインにおいて、ハードウェアに関する形状や配置といった実体情報のモデリングが課題である。そこで本研究では、設計ツールの 1 つとして CAD ツールを考慮し、そのモデル記述方法を検討する。現状技術として CAD ツールは数多く構築されているが、本研究ではオープンソースのツールキットである Geant4(Geometry and Tracking 4)[24, 25)]の CAD 機能を用いる。

Geant4[24, 25)]は、国際機関である欧州原子核研究機構 CERN(英語名：European Organization for Nuclear Research)によって仕様の策定、配布が行われている。高エネルギー物理学の世界標準ツールであり、宇宙、医療、加速器などの分野でも世界的に利用されている。Geant4 は、3 次元のソリッドモデリングが可能であり、CGS(Constructive Solid Geometry)モデルで

形状の記述を行う。CGS モデルとは、数式で表したプリミティブな形状の集合演算(和、積、差)で形状を表現する方法である[26]。さらに、VRML(Virtual Reality Modeling Language)の形式で、実体情報の出力が可能である。VRML とは、3 次元の物体に関する情報を記述するためのファイルフォーマットであり、ISO/IEC 14772-1 で仕様が定義されている[27]。また、多くの CAD/CAE ツールにおいて、VRML の入出力機能が実装されており、実体情報の受け渡しが可能である。

上記のように、基本設計段階で扱うような基本的な CAD 機能が備わっていること、パラメトリックに形状、配置を含む実体情報を扱えること、オープンソースであり今後の開発、展開も容易であることから、Geant4 を CAD ツールの 1 つとして着目した。したがって、設計ツール固有モデルには Geant4 用の CAD のモデルを記述する。

以上、本研究では、システムデザイン手法は SDSI-Cubic 手法、連携する設計ツールは CAD(Geant4)とし、モデル記述方法を構築する。

次に、システムデザインに関する情報を一貫してモデリングするために、各モデルの具体的な構成と記述順序を定義する。SysML を用いたモデルベースシステムズエンジニアリング[28-30]や製品システムの定義手法[10]、SDSI-Cubic 手法における定義手法[15]を踏襲し、また本研究でのこれまでの検討結果を踏まえ、Table 3.2 に示す具体的なモデル構成と、Fig. 3.12 に示す順序でモデルの記述を行うことを提案する。Table 3.2 は、本研究で定義した 4 つのモデルと SysML でも 4 つの柱に挙げられる要求、機能・振る舞い、構造、パラメトリック制約の二軸でモデル構成を整理したものであり、①～⑫の表記は Fig. 3.12 の順序と同じである。

まず概念設計のために、製品システムモデルの記述を行う。製品システムモデルの中には、①要求の定義、②機能・振る舞いの定義、③理想システム構成の定義、④理想システム構成に関する制約関係の定義が含まれる。次に基本設計および基本設計から詳細設計へと繋げるために、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの記述を行う。設計空間固有モデルの中には、⑤設計空間に関する要求の定義、⑥設計空間に関する具体的なシステム構造の定義、⑦その具体的なシステム構造に関する制約関係の定義、⑧最適化問題の定義が含まれる。ツール連携アルゴリズム固有モデルの中には、⑨設計ツールの構成の定義、⑩それらの設計ツールを連携するフローの定義が含まれる。設計ツール固有モデルの中には、⑪設計ツール(本研究では CAD(Geant4))のために具体化したシステム構造の定義、⑫設計ツール(CAD(Geant4))の情報に変換するための制

約関係の定義が含まれる。

Table 3.2 のモデル構成が該当しない部分について述べる。設計空間固有モデル内の機能・振る舞いの項目については、製品システムモデル内の②で十分に定義し、また具体的なシステム構造によって決まる機構などは⑦の制約関係において定義するため該当しない。ツール連携アルゴリズム固有モデル内の要求、パラメトリック制約の項目については、アルゴリズムを構成するための要求は製品システムへの要求から具体化されるものではないこと、ツール連携のための制約関係はあらかじめプログラミングされるものであり、本モデリング手法でモデル化する対象ではないことから該当しない。設計ツール固有モデル内の要求の項目については、設計空間固有モデル内において、⑤を受けて⑥で構造が具体化され、その構造を設計ツールにあったモデルにするため、該当する内容が無いと考えられる。機能・振る舞いの項目については、設計空間固有モデルでの理由と同様に、⑫の制約関係において定義するため該当しない。

以上のようなモデル構成と順序でモデルの記述を行う。モデル記述方法の全体像を構築できたので、以下にその詳細な記述方法について述べる。

Table 3.2　Concrete model composition of new modeling methodology.

	(I) Product system model	(II) Specific model of system design methodology		(III) Specific model of design tool
		(II-i) Specific model of design space	(II-ii) Specific model of tool cooperation algorithm	
Requirements	①Requirements	⑤Design requirements	N/A	N/A
Functions & Behavior	②Functions & behavior	N/A	⑩Flow of tool cooperation for SDSI-Cubic	N/A
Structure	③Ideal system structure	⑥Specific system structure	⑨Composition of design tools for SDSI-Cubic	⑪Specific system structure for CAD (Geant4)
Parametric constraints	④Constraints relating to ideal system structure	⑦Constraints relating to specific system structure ⑧Optimization problem	N/A	⑫Constraints relating to specific system structure for CAD (Geant4)

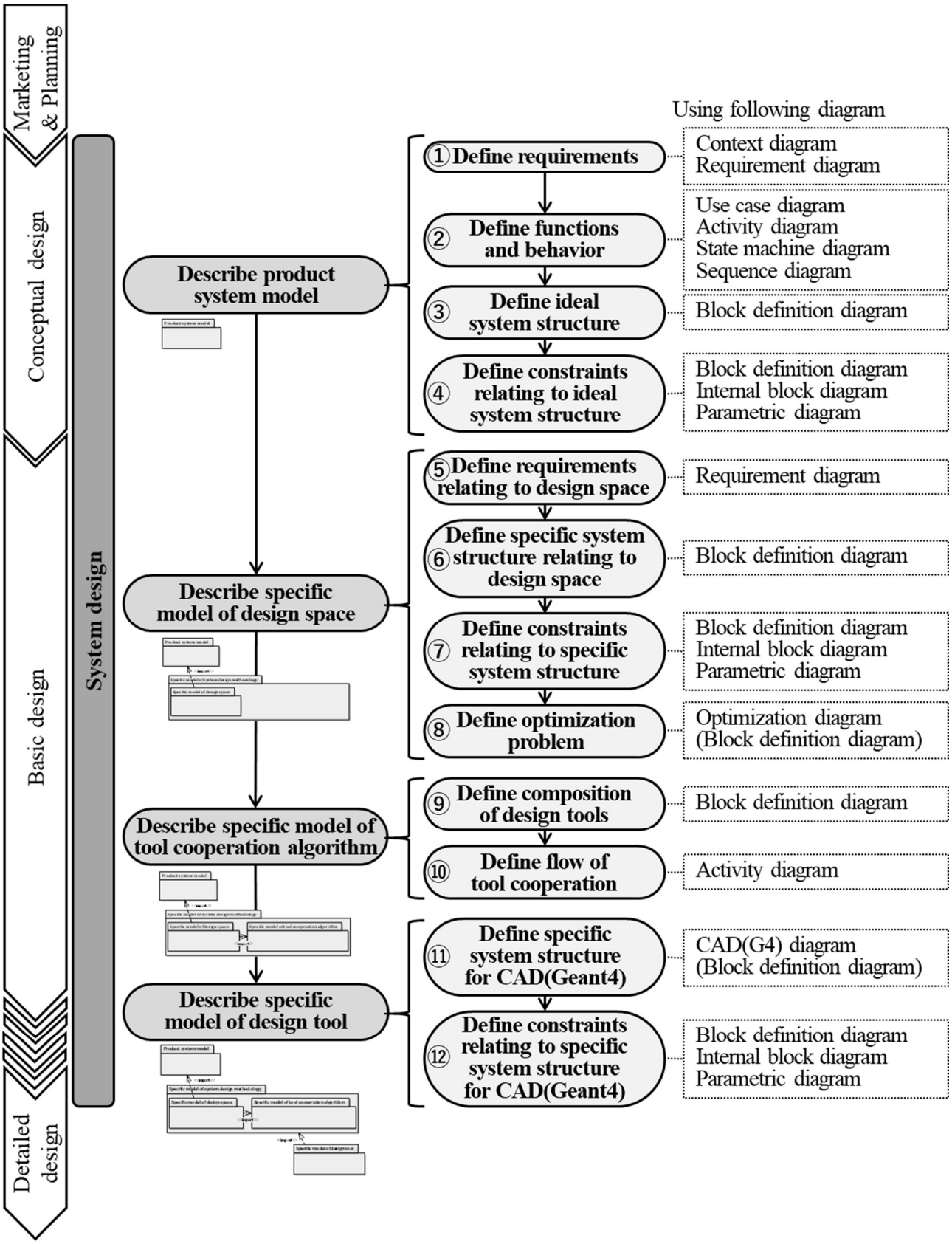


Fig. 3.12 Model description flow for new modeling methodology.

3.3.2　製品システムモデルの記述方法の構築

ここでは、製品システムモデルの記述方法を構築する。モデル記述方法全体の中での位置付けを、Fig. 3.13 に示す。この部分の記述方法については、従来から提案されている手法 [10, 15, 28-30]を踏襲する。要求の定義、機能、振る舞いの定義、理想システム構成の定義、理想システム構成に関する制約関係の定義について、以下に述べる。

3.3.2.1　製品システムに関する要求の定義

まず、対象となる製品システムと外部(外部システムや外部環境など)を明確に定義するため、コンテキスト図を用いて記述を行う。例えば、外部システムと協調する必要がある場合はシステム間のインターフェース設計、過酷な環境の仕向け地がある場合は外部環境への耐性設計が重要であるように、設計範囲の明確化はもちろんのこと、設計する上で設

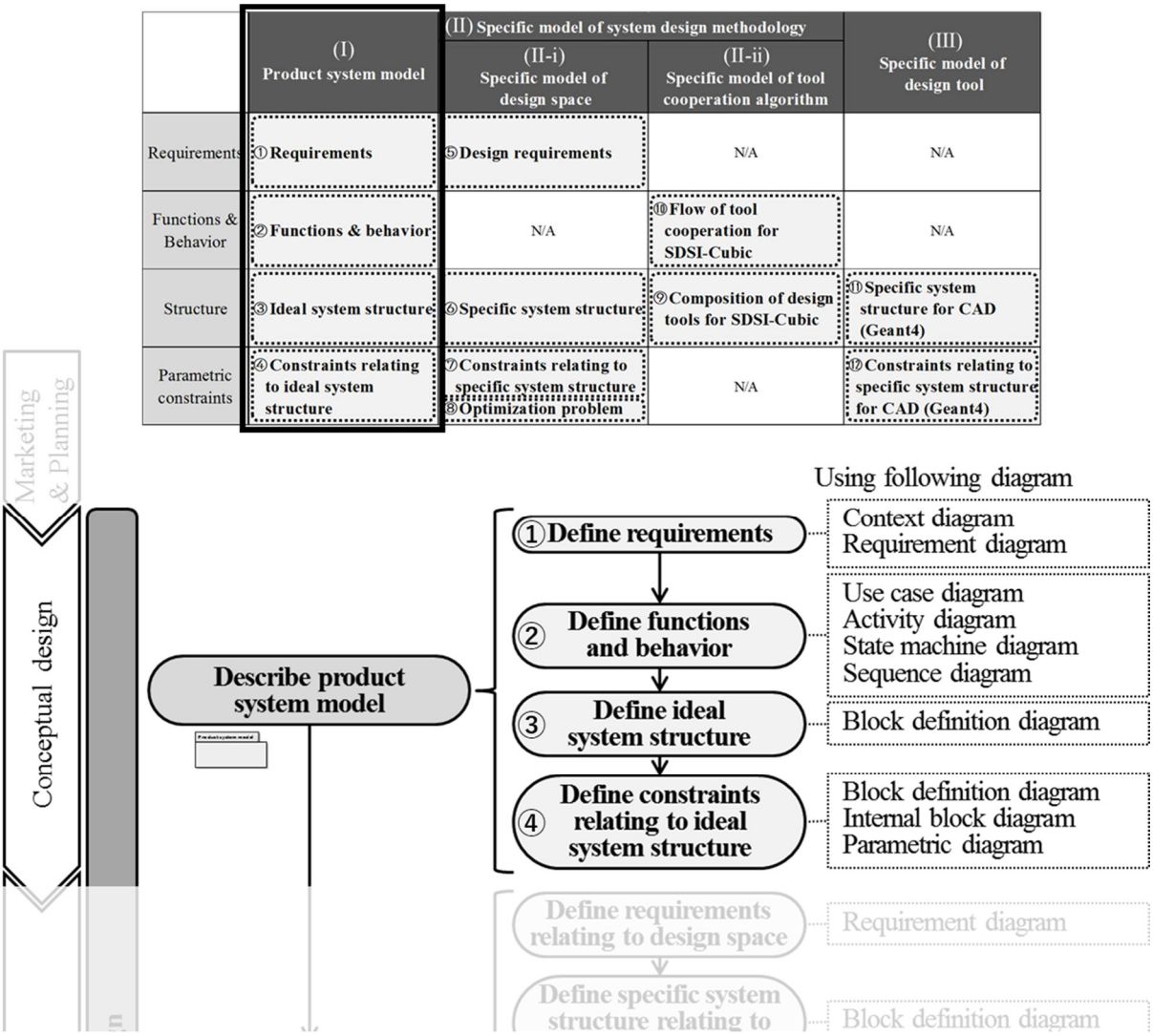


Fig. 3.13　Focus of this section.

計対象の他にどのようなモノやコトを気にしているか、気にしなければいけないかを記述する。コンテキスト図は、内部ブロック図をカスタマイズした図である。Fig. 3.14 にモデル例を示す。Fig. 3.14 では、放射線計測システムが設計対象のシステムであり、外部としてはユーザ、放射線といった計測対象、屋内、屋外の環境、温度などの外部環境が記述され、対象システムと外部を明確化している。

次に、製品システムへの要求を定義し、さらに詳細な要求へと分解、分析を行うために、要求図を用いて記述を行う。要求図には、対象システムに関する機能要求、非機能要求を含めた全ての要求を記述する。Fig. 3.15 にモデル例を示す。階層的に表現することで、要求の導出関係や粒度を明確にする。さらに、要求を満たしているかの検証するために、テストケースを定義し「verify」の関係や構造を定義し「satisfy」の関係も記述する。Fig. 3.15 では、放射線を計測することが最上位の要求であり、正確性や住民のためのユーザビリティという要求から成る。正確性を実現ために、計測カウントを増やすことやノイズを低減することという要求が導出されている。また、住民のためのユーザビリティを実現するために、容易さや低価格という要求が導出されている。このように、要求を階層的に分解、分析し、システム要素が満たさなければならない要求まで明確化する。

以上、上記のような手順で記述することで、製品システムに関する要求を定義することができる。

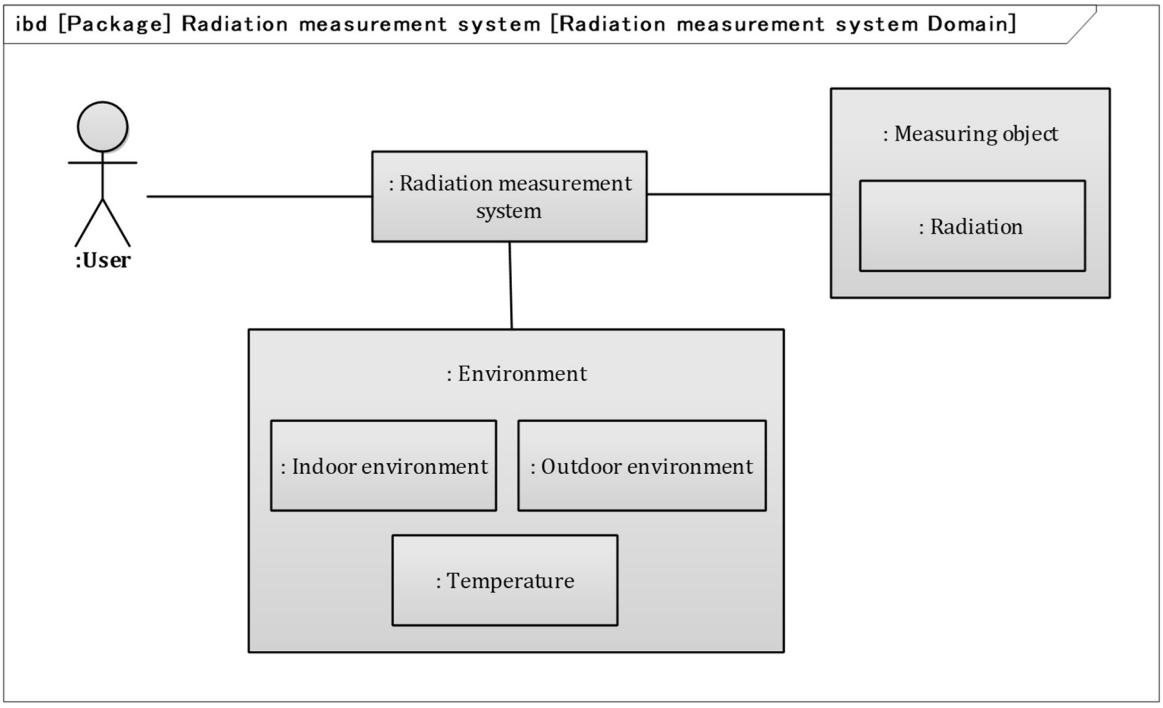


Fig. 3.14　Example of context diagram in product system model.

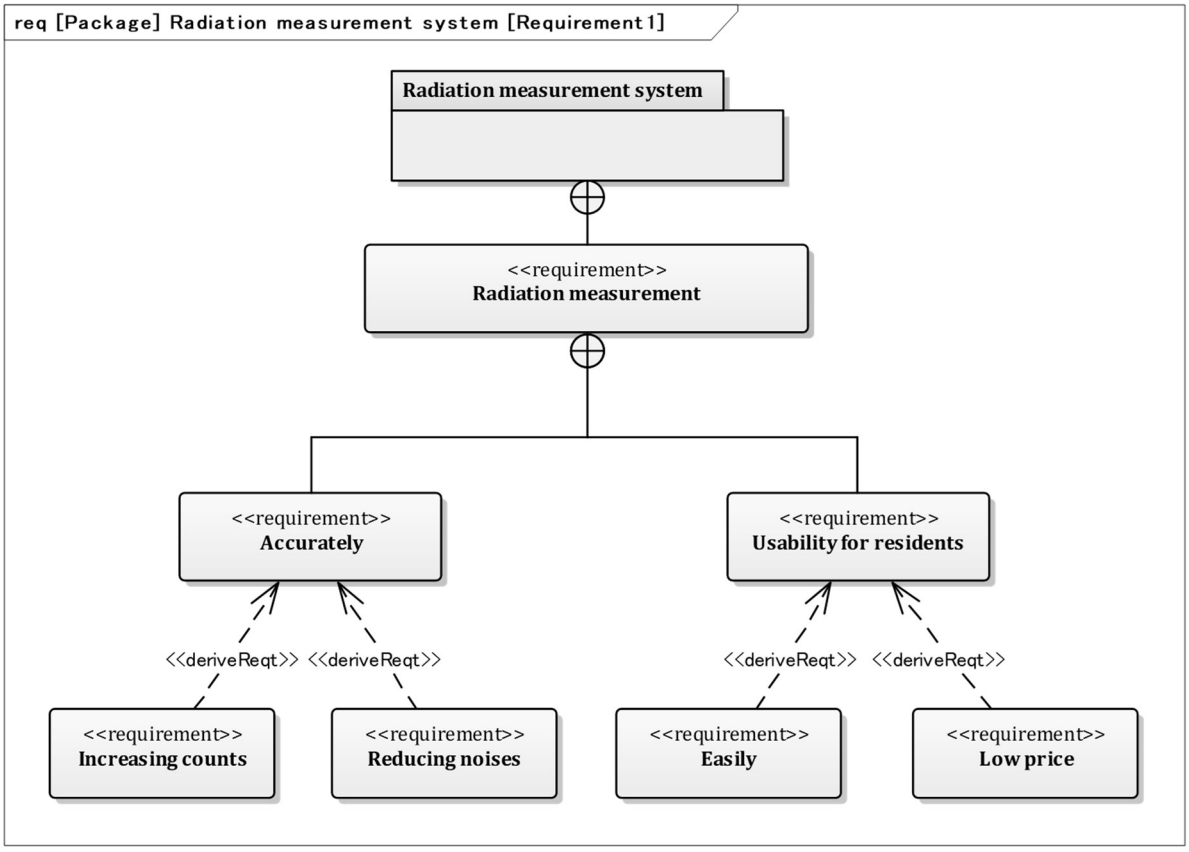


Fig. 3.15　Example of requirement diagram in product system model.

3.3.2.2　製品システムに関する機能、振る舞いの定義

要求を満たすような、製品システムに関する機能、振る舞いを定義するために、ユースケース図、アクティビティ図、ステートマシン図、シーケンス図を用いて記述を行う。ユースケース図は、システムが外部に提供する機能を記述することができ、大まかに機能を表現する。アクティビティ図は、システムの機能、処理の流れを記述する。シーケンス図やステートマシン図はシステム内の相互作用や状態およびその遷移を記述するもので、システム内部におけるより詳細な振る舞いの記述に適している。ここでは、ユースケース図を例に、記述方法を述べる。ユースケース図を用いて記述したモデル例を Fig. 3.16 に示す。Fig. 3.16 では、放射線計測システムは、ユーザに対して、放射線に対する安全性を確認するという機能を提供していることを表現している。放射線に対する安全性を確認する機能は､外部被ばくの影響を監視するという機能を含む｡外部被ばくの影響を監視する機能は、外部の放射線と関係しており、放射能濃度の測定、放射性核種の推定、空間放射線量の測定といった機能を含むことを表現している。

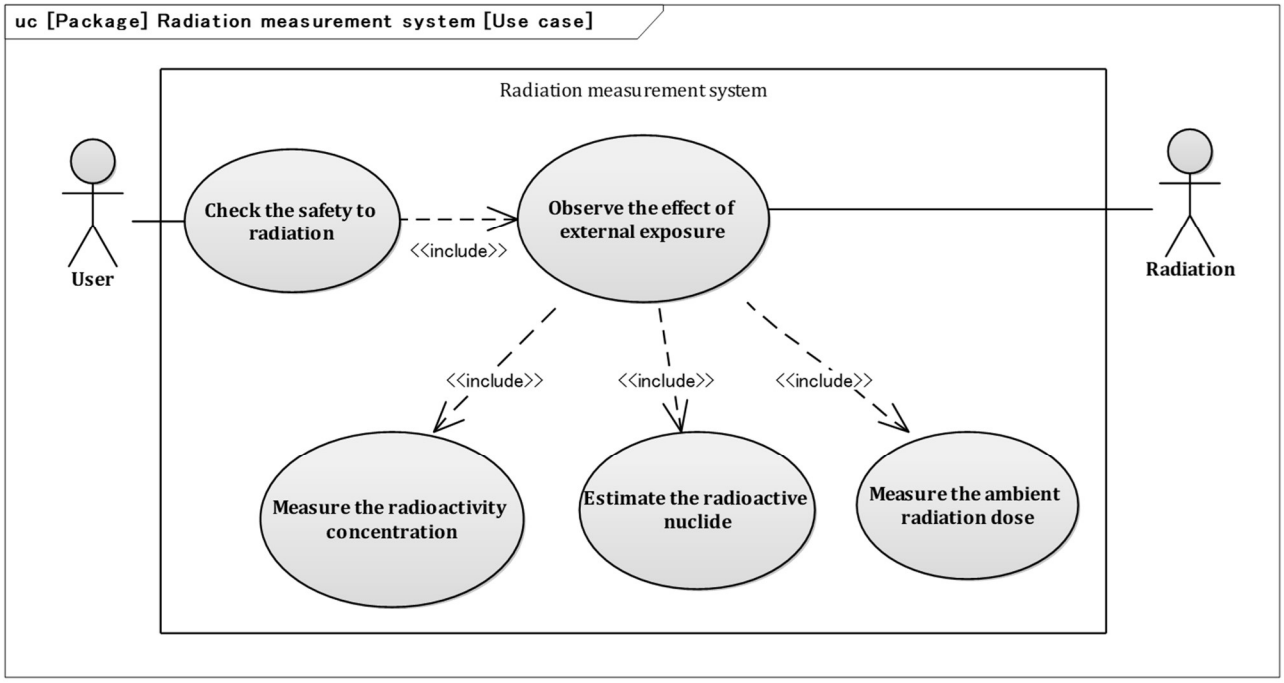


Fig. 3.16　Example of use case diagram in product system model.

以上、上記のように、ユースケース図では、システムが外部に提供する機能と、システム内部で実現する大まかな機能を記述することができる。さらに、システムが持つ性質によって、アクティビティ図、シーケンス図、ステートマシン図も用いて、製品システムに関する機能、振る舞いを定義することができる。

3.3.2.3　理想システム構成の定義

要求を満たし、機能、振る舞いを実現できる理想的なシステム構成を定義するために、ブロック定義図を用いて記述を行う。<<block>>という要素を用いて階層的にシステムの構成要素を表現する。製品システムはハードウェア、ソフトウェアから構成されることが多く、その両方を合わせてシステム構成を記述する。また要求図でも述べたが、要求と充足関係(satisfy)を繋げることで、どの要求を実現するための構成なのかをトレースすることができる。ここで注意したいことは、あくまで理想的なシステム構成であり、その時々の設計によって変更される構成は記述すべきではないということである。つまり、実現構造としてハードウェア、ソフトウェアの選択が可能な場合や、ハードウェアで言えば部品、形状、配置などによってその構成が変わるような場合は、それらの設計案は設計空間固有モデルに記述されるべきである。しかし、法令等により決められている部分や、従来技術を

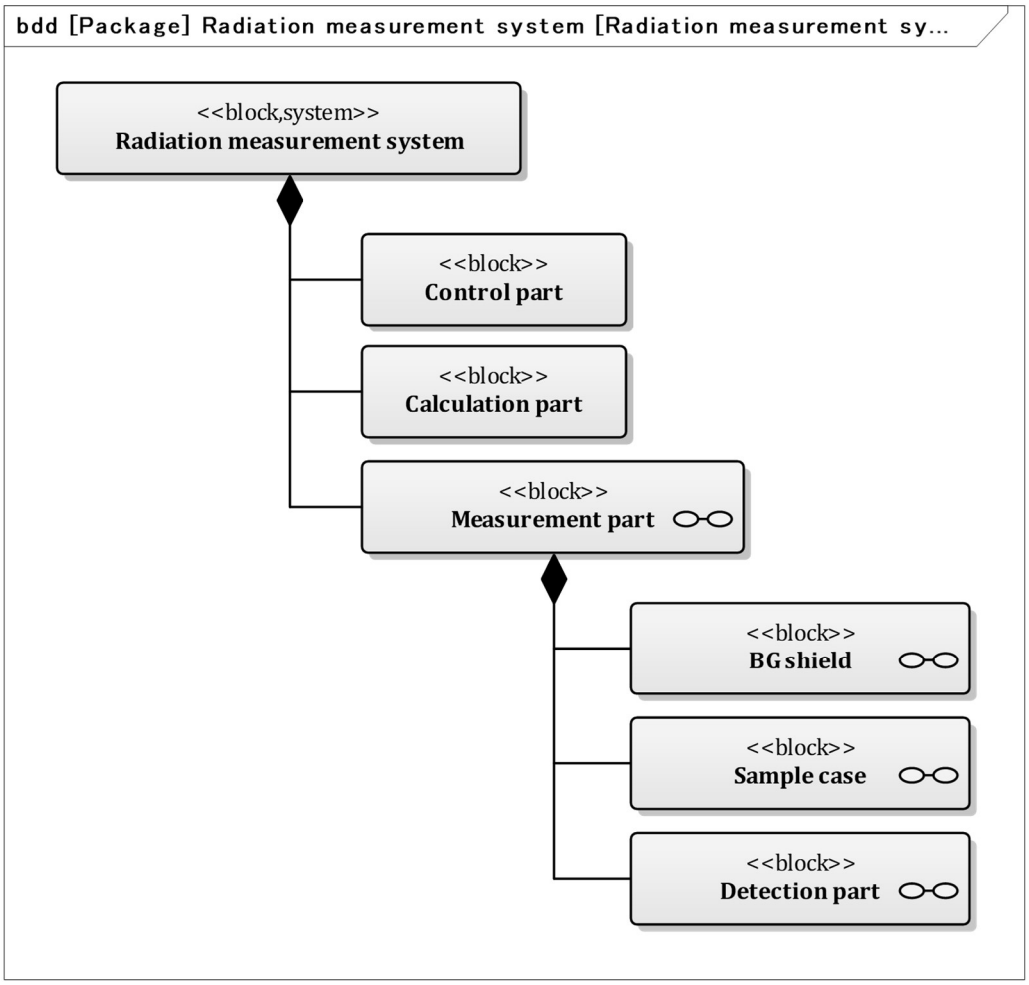


Fig. 3.17　Example of block definition diagram in product system model.

鑑みて一般的に要求を満たす実現構成が変わりないと考えられる部分については記述しても構わない。ブロック定義図を用いて記述したモデル例を Fig. 3.17 に示す。Fig. 3.17 では、放射線計測システムが制御部、演算部、計測部で構成され、さらに計測部は、バックグラウンド遮蔽材、試料容器、検出部から構成されることを表現している。例えば、この例でみると、放射線計測の分野では、放射能濃度の計測のためにはバックグラウンドの遮蔽が必須であり、その実現構成としてバックグラウンド遮蔽材は変わらない構成要素である。

以上、上記のように、製品システムの理想システム構成を定義することができる。

3.3.2.4　理想システム構成に関する制約関係の定義

前述の通り定義した理想システム構成に関して、制約関係の定義を行う。制約関係は、ブロック定義図、内部ブロック図、パラメトリック図を用いて記述を行う。主には一般的

な物理式や経済式などのシステム構成要素内もしくは要素間にある制約関係を記述する。手順としては、ブロック定義図を用いて、パラメータの型および制約式の記述を行う。次に、内部ブロック図、パラメトリック図を用いて、どの構造(ブロック)に属するかを記述し、パラメータと式の関係を可視的に表現する。それぞれについて、以下に説明する。

まず、ブロック定義図を用いて、パラメータの型を記述する。ここでいうパラメータの型は、具体的な性質(数値や単位など)は持たず、どのようなパラメータがあるかという観点で、<<ValueType>>という要素を用いて記述する。パラメータの具体的な性質は、設計によって変わるため、設計空間固有モデルに記述されるものである。記述した例を、Fig. 3.18 に示す。Fig. 3.18 では、計測部コスト、バックグラウンド遮蔽材コスト、試料容器コスト、検出部コストというパラメータの型が表現されている。

次に、ブロック定義図を用いて、制約式を記述する。式を構成するパラメータには前述で定義したパラメータの型を利用し、<<constraintBlock>>という要素を用いて記述する。制約式を記述した例を、Fig. 3.19 に示す。<<constraint>>と表示されているが、これは<<constraintBlock>>のことである。Fig. 3.19 では、計測部コストはバックグラウンド遮蔽材コスト、試料容器コスト、検出部コストの和であることが表現されている。

次に、内部ブロック図を用いて、どの構造に属するパラメータであるかを記述する。前述で定義したパラメータの型を利用し、パートプロパティという要素を用いて記述する。記述した例を、Fig. 3.20 に示す。Fig. 3.20 では、計測部の内部ブロック図に計測部コスト、バックグラウンド遮蔽材の内部ブロック図にバックグラウンド遮蔽材コスト、試料容器の内部ブロック図に試料容器コスト、検出部の内部ブロック図に検出部コストが表現されている。

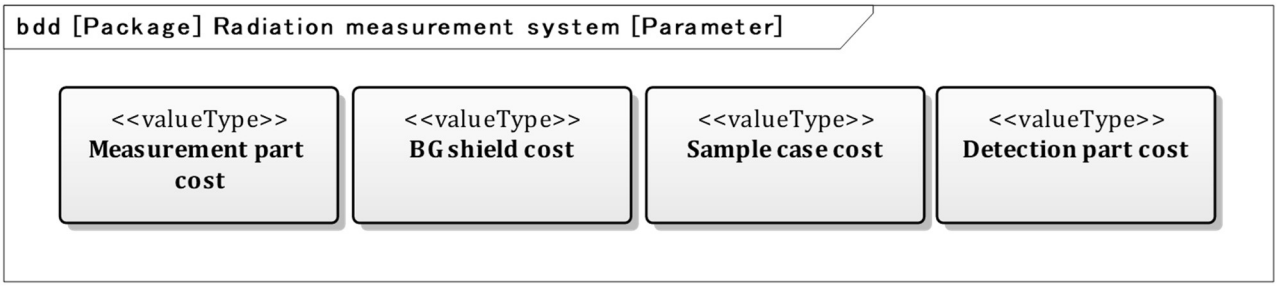


Fig. 3.18　Example of parameter type definition in product system model.

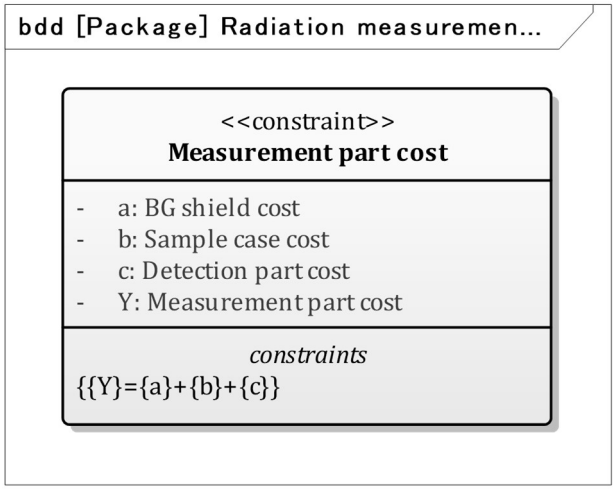


Fig. 3.19　Example of constraint definition in product system model.

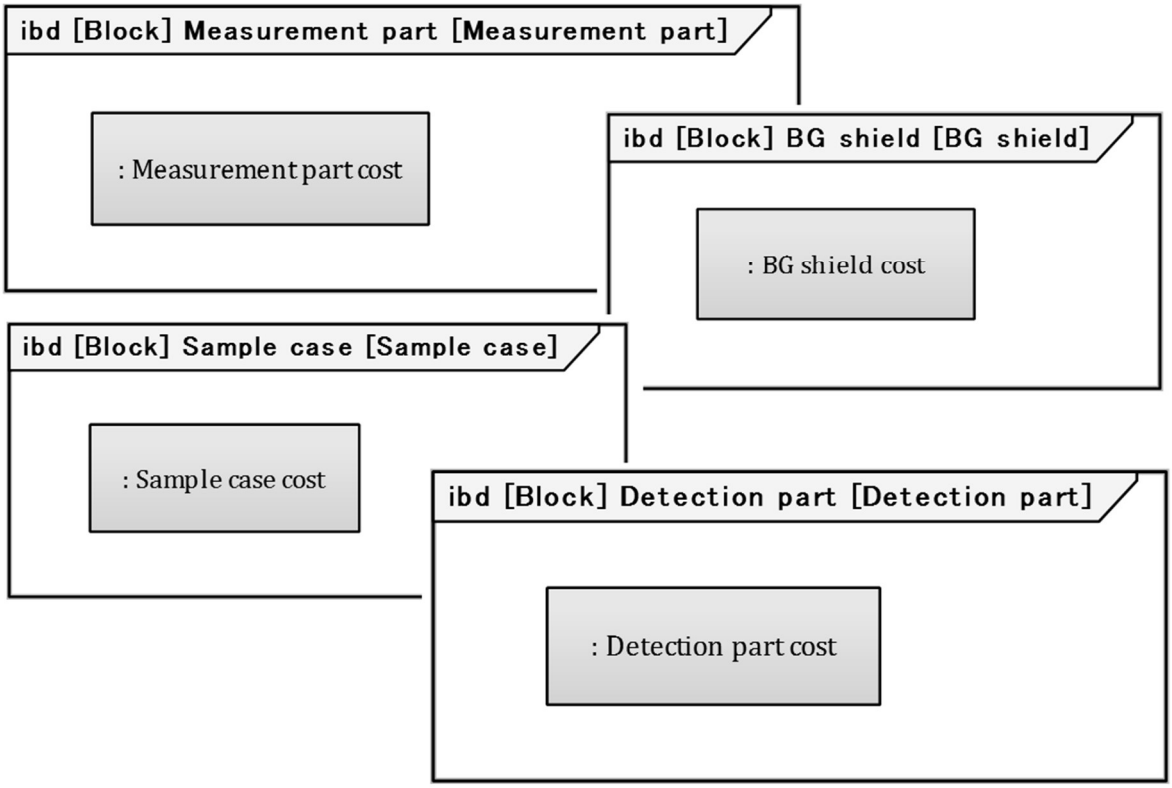


Fig. 3.20　Example of internal block diagram in product system model.

次に、パラメトリック図を用いて、パラメータと式の関係を可視的に記述する。前述で定義した制約式を型に利用し、制約プロパティという要素で式を表現する。前述に内部ブロック図で定義したパートプロパティ要素がパラメータを表現する。パラメトリック図を

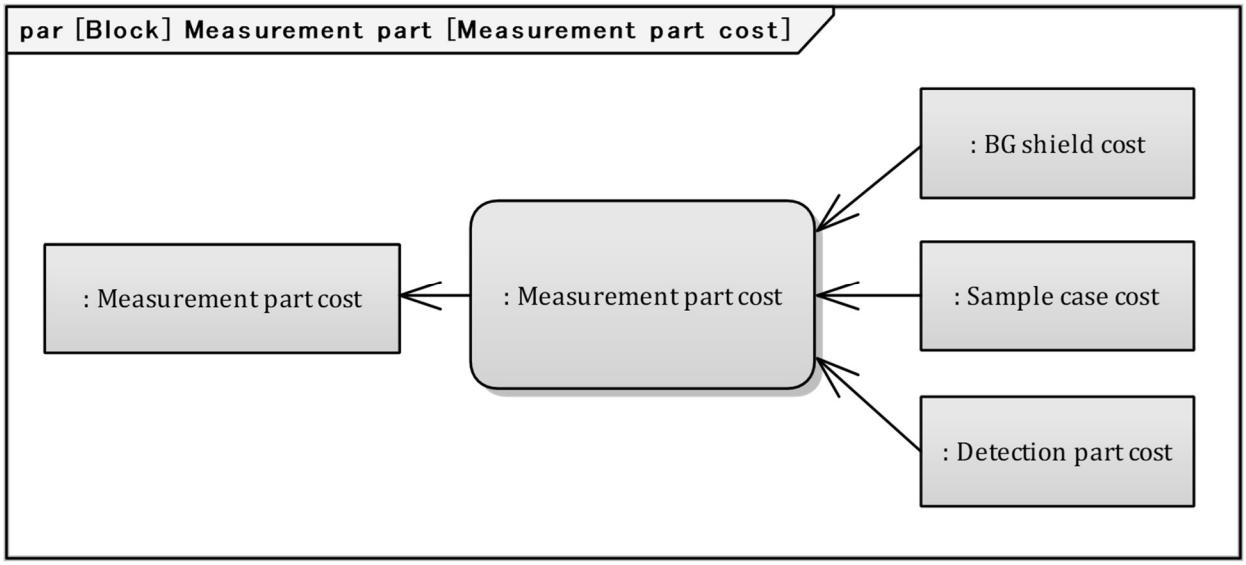


Fig. 3.21　Example of parametric diagram in product system model.

用いて表現することで、複雑な制約関係、入出力関係を明確に表現、把握することができる。記述した例を、Fig. 3.21 に示す。Fig. 3.21 では、入力はバックグラウンド遮蔽材コスト、試料容器コスト、検出部コスト、出力は計測部コスト、入出力間の式関係は、<<constraintBlock>>で定義した計測部コスト式であることが表現されている。

以上、上記のような手順で、理想システム構成に関する制約関係を定義することができる。

以上、要求の定義、機能、振る舞いの定義、理想システム構成の定義、理想システム構成に関する制約関係の定義を各記述方法に従って行うことで、製品システムモデルを記述することが可能である。製品システムモデルの記述方法が構築できたので、次に設計空間固有モデルの記述方法の構築を行う。

3.3.3　設計空間固有モデルの記述方法の構築

ここでは、設計空間固有モデルの記述方法を構築する。モデル記述方法全体の中での位置付けを、Fig. 3.22 に示す。設計空間固有モデルを記述する目的は、設計意図や設計目的を明確にし、設計空間を決め、最適化設計を可能とすることである。そのために、設計空間に関する要求の定義、設計空間に関する具体的なシステム構造の定義、その具体的なシステム構造に関する制約関係の定義、最適化問題の定義を行う。以下に、詳細を述べる。

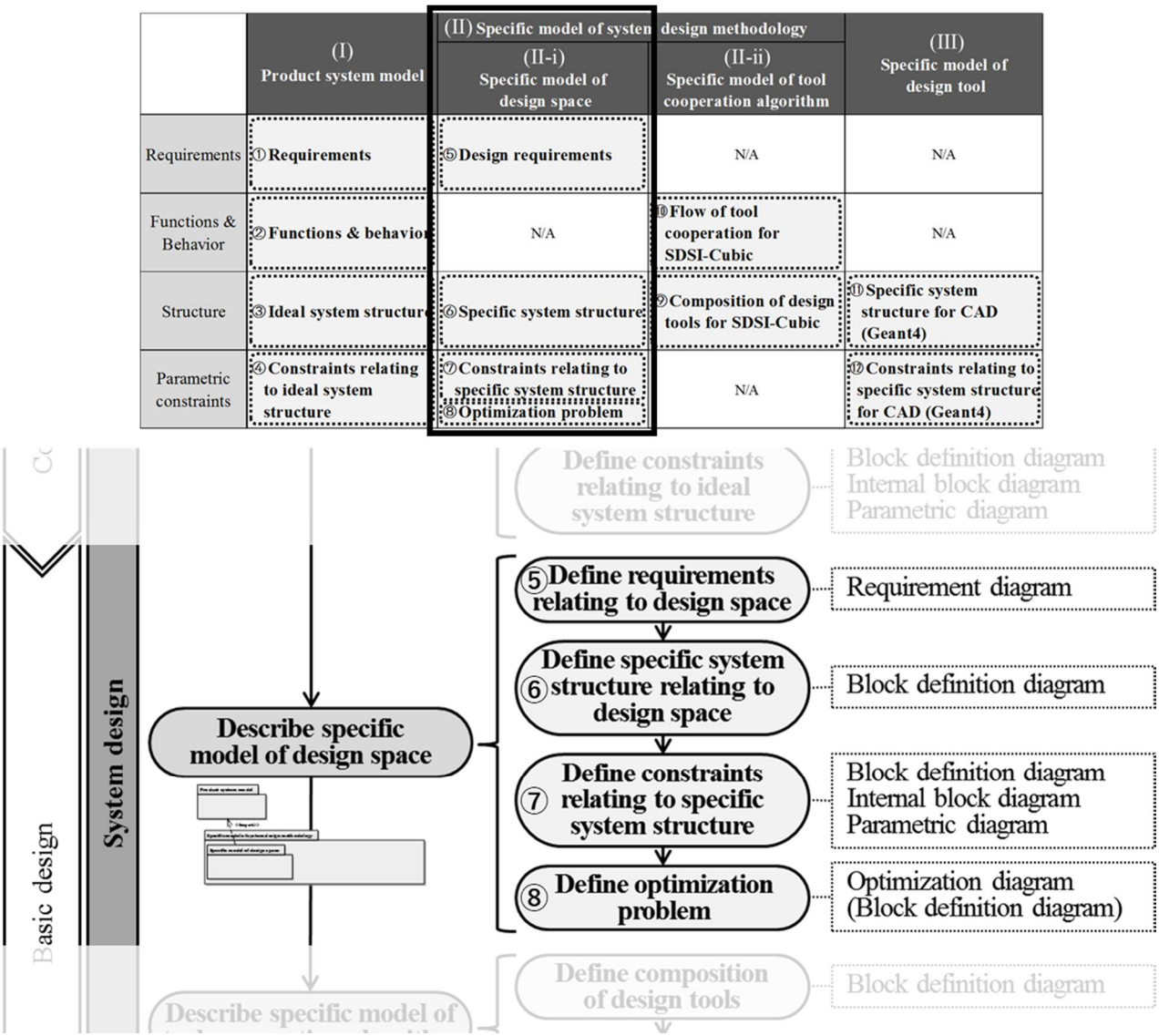


Fig. 3.22　Focus of this section.

3.3.3.1　設計空間に関する要求の定義

製品システムモデルで定義された要求を基に、具体的なシステム構造(例えば形状など)を導出するような要求まで詳細化する。この要求定義の重要な点は、設計意図や設計目的を明らかにし、設計案に至る根拠を明確に記述することである。そのようにすることで、設計情報のトレーサビリティの確保や設計変更の容易性を実現する。記述は要求図を用いて行う。記述した例を、Fig. 3.23 に示す。Fig. 3.23 では、上部 3 つの要求(バックグラウンド放射線を遮蔽、屋外で計測、低加工コスト)は、製品システムモデルの要求定義で記述されたものである。この例では、バックグラウンド放射線を遮蔽し、かつ屋外で計測するこ

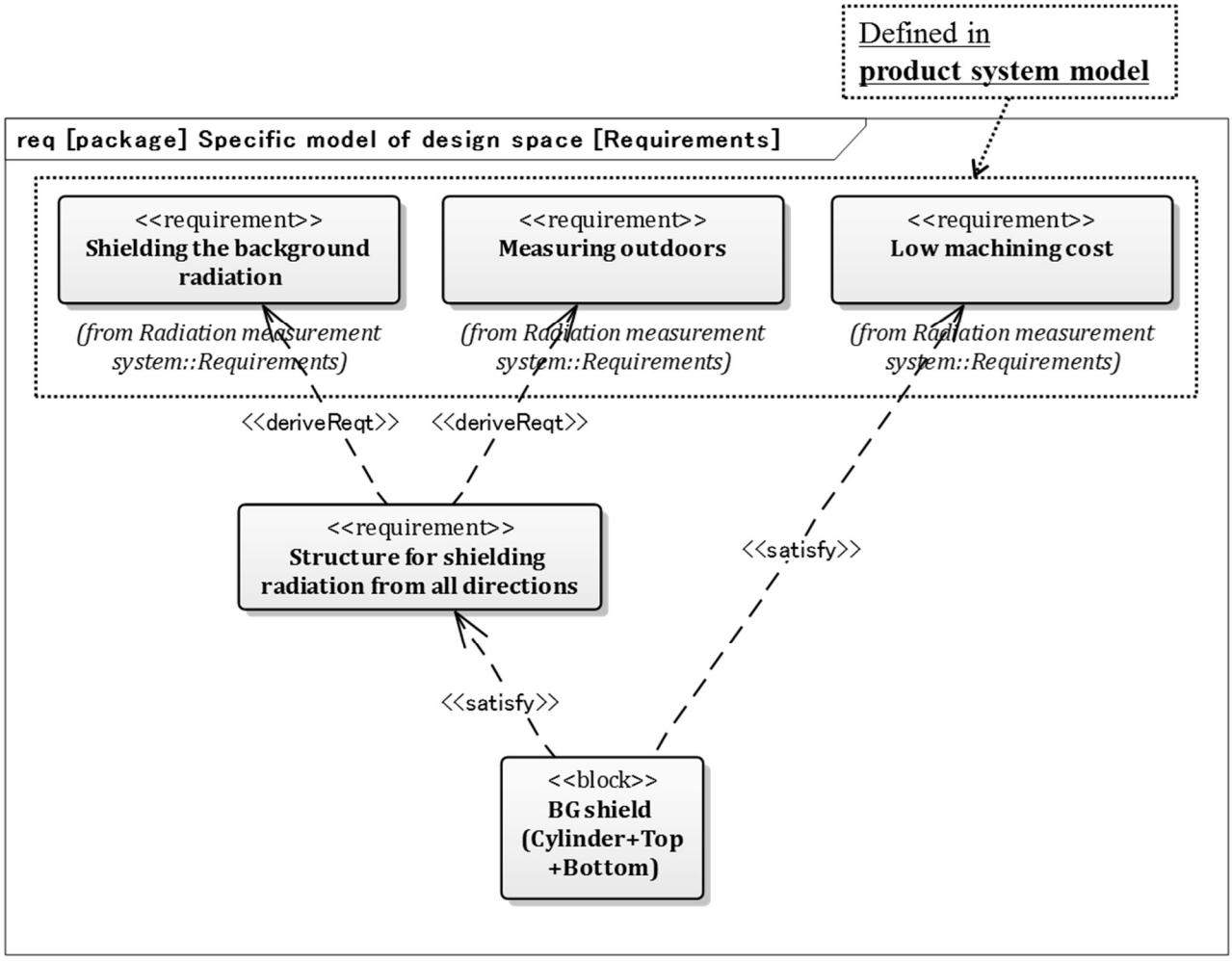


Fig. 3.23　Example of requirement diagram in specific model of design space.

とを満たすために、全方位からの放射線を遮蔽する構造という要求を導出している。そして、全方位からの放射線を遮蔽し、かつ低加工コストという要求を満たすシステム構造として、円筒と上下面という形状をもつバックグラウンド遮蔽材を定義している。

以上のように、具体的なシステム構造に至るまでの、設計意図や設計目的に関係する詳細な要求を定義することができる。

3.3.3.2　設計空間に関する具体的なシステム構造の定義

次に、設計意図や設計目的から具体化されたシステム構造の定義を行う。記述はブロック定義図を用いて行う。製品システムモデル内で既に記述されたブロック要素に対して、新たに記述したブロック要素を、汎化を用いて接続することとする。汎化とは、白抜き三角矢印で表現されるもので、三角矢印が付いている側が抽象要素、矢印が付いていない側

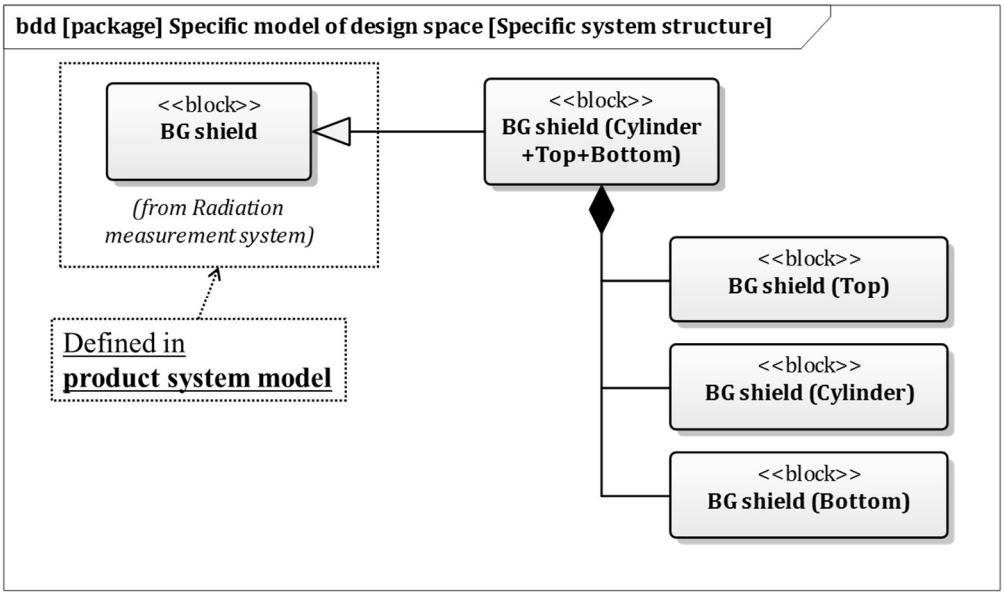


Fig. 3.24　Example of block definition diagram in specific model of design space.

が具象要素であることを表す。つまり、理想システム構成として定義されたシステム要素を、より具体的なシステム要素として定義することで、その設計における設計案を明確に記述することができる。具体的なシステム要素とは、ハードウェアを例にすると、選択する部品や形状、配置といった実体情報を含む要素である。記述した例を、Fig. 3.24 に示す。Fig. 3.24 では、製品システムモデルで記述されていたバックグラウンド遮蔽材に対し、円筒と上下面の形状をもつバックグラウンド遮蔽材というより具体的なシステム要素を記述している。さらに、バックグラウンド遮蔽材は、上面、円筒、下面の 3 つの部品から構成される構造であることを記述している。

以上のように、設計意図や設計目的から導出、明確化されたその設計における具体的なシステム構造を定義することができる。

3.3.3.3　具体的なシステム構造に関する制約関係の定義

次に、前述で定義した具体的なシステム構造に関する制約関係の定義について述べる。製品システムモデルには一般的な制約関係が記述されているが、具体的なシステム構造が定義されれば、より詳細な制約関係の記述が可能である。言い換えるならば、製品システムモデルで定義したパラメータの詳細化である。定義する制約式は実行可能な式であり、近似式やデータベース利用式なども含まれる。記述は、理想システム構成に関する制約関

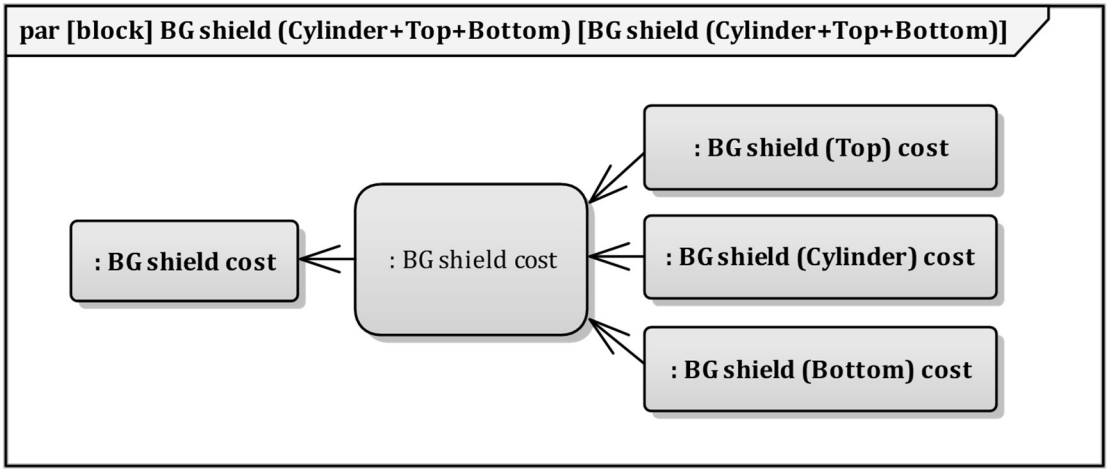


Fig. 3.25　Example of parametric diagram in specific model of design space.

係を記述した手順と同様に、ブロック定義図、内部ブロック図、パラメトリック図を用いて行う。その一部であるパラメトリック図で記述した例を、Fig. 3.25 に示す。Fig. 3.25 では、バックグラウンド遮蔽材コストが、上面、円筒、下面それぞれのコストから導出される関係を記述している。これは、前述で定義した具体的なシステム構造に関連する制約関係である。

以上のように、設計意図や設計目的によって決定された具体的なシステム構造に関する制約関係を定義することができる。

3.3.3.4　最適化問題の定義

次に、最適化設計を実行するための、パラメータの情報、最適化問題の定義について述べる。SysML には、最適化問題を定義するための記述方法は無い。しかし、ステレオタイプ、および一連のステレオタイプをまとめたプロファイルを定義することで、SysML に新たな概念を加え、拡張することができる。SDSI-Cubic 手法でも最適化問題を記述するためのステレオタイプが検討されているが、製品システムモデル内に内包される形で記述されてしまうため、本論文では新たに最適化問題を記述するためのプロファイル、および記述方法を定義する。

まず､最適化問題を記述するためのプロファイルを定義する｡一般的に最適化問題とは、目的関数、設計変数、制約条件から構成される [31)]。制約条件を満たす範囲で、目的関数を最小あるいは最大にする設計変数の値、つまり最適解を求める。ここでは放射線計測シス

テムにおける最適化問題を例に、最適化問題を構成する各要素の定義と要素間の関係を整理、プロファイルを定義し、Fig. 3.26 に示す。

最適化問題の例を説明する。放射線計測システムには、多数の相反する設計項目があり、その中でも計測センサ部分の設計がシステムの支配的な相反問題となる。センサは高感度で低コストが求められる。センサにはシンチレータ結晶を用いて、結晶に入射する放射線を光信号に変換して計測を行うが、その感度 G は結晶の体積 x に比例するため、高感度化には大体積化が求められる。しかし、結晶の大体積化に伴い、コスト H は増大してしまうため、感度とコストは相反する問題である。以下に、定式化した最適化問題を示す。

$$maximize \quad O = f(x) = \frac{G}{H} \tag{3.1}$$

$$G = g(x) = a \cdot x \quad (a = 1320) \tag{3.2}$$

$$H = h(x) = b \cdot x + c \quad (b = 1000,\ c = 3000) \tag{3.3}$$

$$subject\ to \quad H \leq 50000 \tag{3.4}$$

$$4 \leq x \leq 50 \quad (x: integer) \tag{3.5}$$

Oは目的関数の結果を表す目的関数パラメータ、$f(x)$は目的関数、G、Hは感度、コストを表す変数パラメータ、$g(x)$、$h(x)$は感度、コストの関数、xは体積を表す制約条件を持つ設計変数、a、b、cは感度やコストに係る初期値を持つ定数パラメータである。

最適化問題を整理した結果を、Fig. 3.26 の定義結果(カッコ内の名称)と合わせて説明する。関数(Function)は、設計変数(DesignVariable)を持ち、場合により制約条件(ConstraintCondition)、パラメータ(Parameter)を持つ。目的関数(ObjectiveFunction)は、関数(Function)を具体化したものであり、結果を表す目的関数パラメータ(ObjFuncParam)を持つ。次に、属性を整理するために、変数(Variable)という抽象要素を追加する。コンピュータ上で数値計算することも考慮すると、変数(Variable)は、実数や整数といった値の型(type)、値の単位(unit)を持つ。目的関数パラメータ(ObjFuncParam)は、変数(Variable)の属性(値の型(type)、値の単位(unit))に加え、最小化、最大化、目標値といった最適化の評価基準(criterion)の属性を持つ。制約条件(ConstraintCondition)は、変数(Variable)の属性(値の型(type)、値の単位(unit))に加え、離散値(discrete)、最大値(max)、最小値(min)という制約条件の内容の属性を持つ。パラメータ(Parameter)は、変数(Variable)の属性(値の型(type)、値の単位(unit))に加え、初期値(initial value)を持つ。設計変数(DesignVariable)は、パラメータ(Parameter)の属性(値の型(type)、値の単位(unit)、初期値(initial value))と、制約条件の内容の属性(離散値

(discrete)、最大値(max)、最小値(min))を持つ。

以上をまとめると、最適化問題は、最適化の評価基準を示す目的関数パラメータ(ObjFuncParam)、設計変数(DesignVariable)、制約条件(ConstraintCondition)、初期値を持つパ

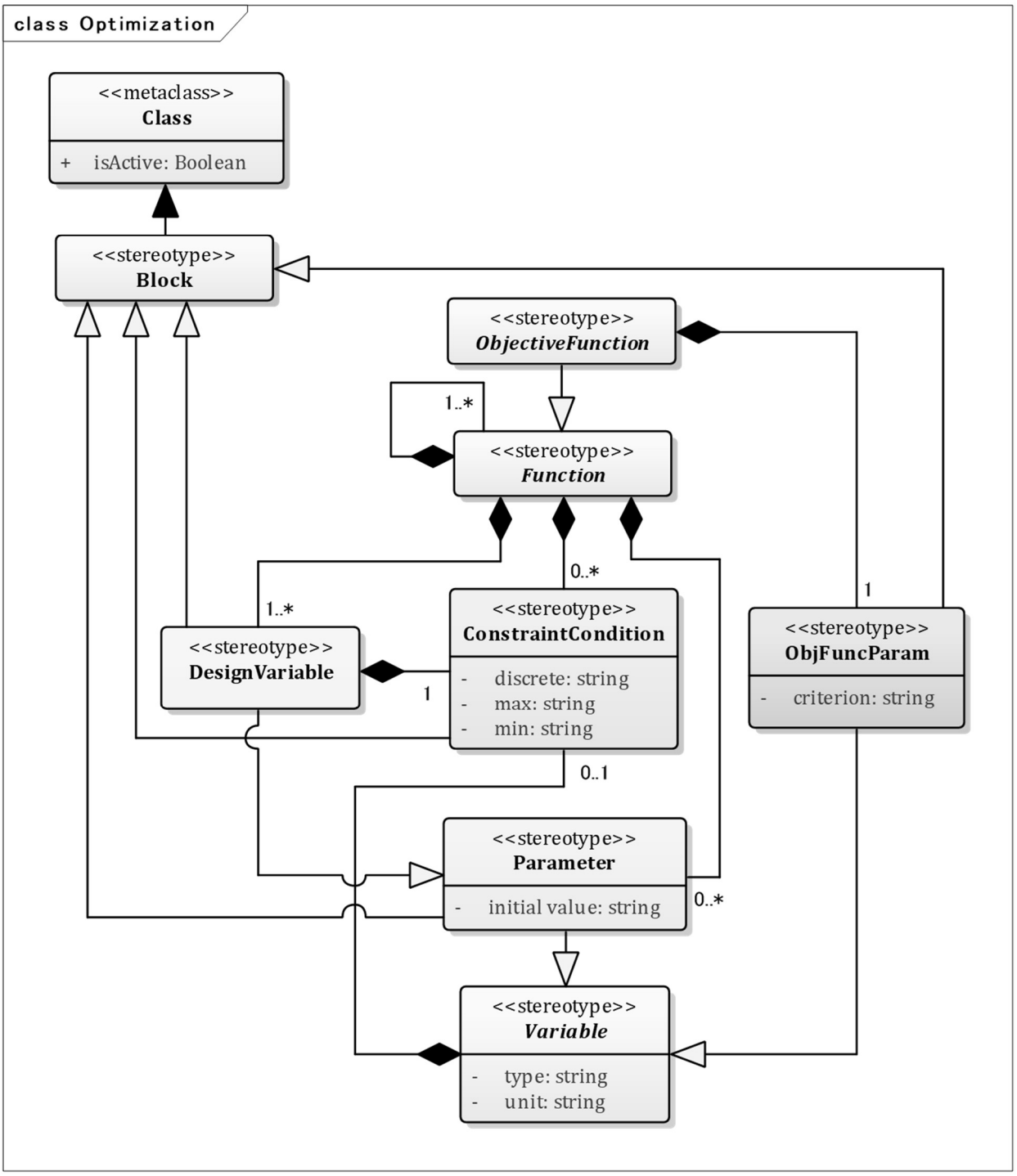


Fig. 3.26　An optimization profile for specific model of design space.

ラメータ(Parameter)の 4 つの要素で記述することが可能である。本研究では、これら 4 つのステレオタイプ要素を、SysML のブロック要素を特化した要素として記述することとする。

次に、前述のステレオタイプを用いた、最適化問題の記述方法の定義を行う。製品システムモデル、もしくは設計空間固有モデル内で、どのようなパラメータがあるか、およびパラメータ間の制約関係については既に定義されている。そこで、最適化問題を定義するということは、パラメータに対して、最適化問題という新たな性質を付け加えることを意味する。記述はブロック定義図を用いて行い、これを最適化図と呼ぶ。既に記述された<<ValueType>>要素を用いたパラメータの型に対して、追加したステレオタイプ(<<ObjFuncParam>>、<<DesignVariable>>、<<ConstraintCondition>>、<<Parameter>>)のいずれかの要素を、汎化を用いて接続することとする。最適化問題を記述した例を、Fig. 3.27 に示す。最適化問題は、前述で定式化した放射線計測システムに関するものである。Fig. 3.27 の上側には、製品システムモデル内に記述されたパラメトリック図も合わせて記載している。Fig. 3.27 では、式(3.1)のOである SDSI-C というパラメータに対して、目的関数パラメータ(<<ObjFuncParam>>)の SDSI-C_param という要素を汎化接続している。式(3.2)、(3.3)、(3.5)のxである ScintiSize というパラメータに対して、設計変数(<<DesignVariable>>)の ScintiSize_param という要素を汎化接続している。式(3.1)、(3.3)、(3.4)のHである ScintiCost というパラメータに対して、制約条件(<<ConstraintCondition>>)の ScintiCost_param という要素を汎化接続している。式(3.1)～(3.5)のGである Sensitivity、aである SensitivityPerSize、bである ScintiCostPerSize、cである PackagingCost というそれぞれのパラメータに対して、初期値を持つパラメータ(<<Parameter>>)の各要素を汎化接続している。

上記のような手順で、本研究で定義したステレオタイプを用いて、最適化設計を実行するための最適化問題を定義することができる。

以上、設計空間に関する要求の定義、設計空間に関する具体的なシステム構造の定義、その具体的なシステム構造に関する制約関係の定義、最適化問題の定義を各記述方法に従って行うことで、設計空間固有モデルを記述することが可能である。設計空間固有モデルの記述方法が構築できたので、次に、ツール連携アルゴリズム固有モデルの記述方法を構築する。

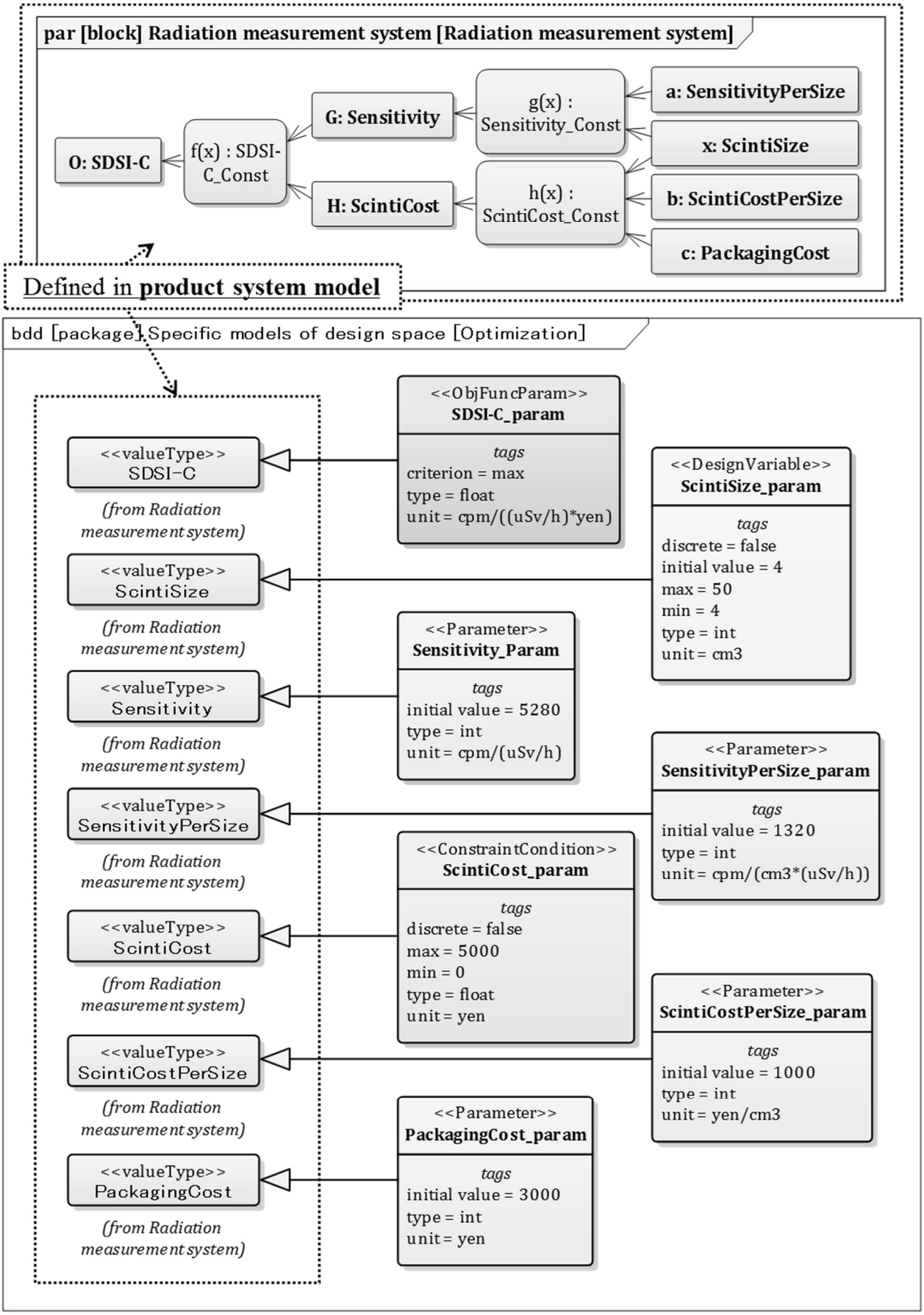


Fig. 3.27 Example of optimization diagram in specific model of design space.

3.3.4　ツール連携アルゴリズム固有モデルの記述方法の構築

ここでは、ツール連携アルゴリズム固有モデルの記述方法を構築する。モデル記述方法全体の中での位置付けを、Fig. 3.28 に示す。ツール連携アルゴリズム固有モデルを記述する目的は、設計ツールの選択と順序を定義することで、設計ツールとの連携を可能とすることである。そのために、設計ツールの構成の定義、それらの設計ツールを連携するフローの定義を行う。以下に、詳細を述べる。

3.3.4.1　設計ツールの構成の定義

まず、設計ツールの構成の定義を行う。記述はブロック定義図を用いて行う。本研究では、SDSI-Cubic 手法のフレームワークを利用して実装を行うため、SDSI-Cubic 手法がもつ機能に対して、どの設計ツールを利用して実現するかを記述する。ブロック要素を用いて記述した SDSI-Cubic 手法がもつ機能に対して、<<SDSI-CubicTool>>というステレオタイプの要素を汎化接続して記述する。記述した例を、Fig. 3.29 に示す。本研究では、形状や配

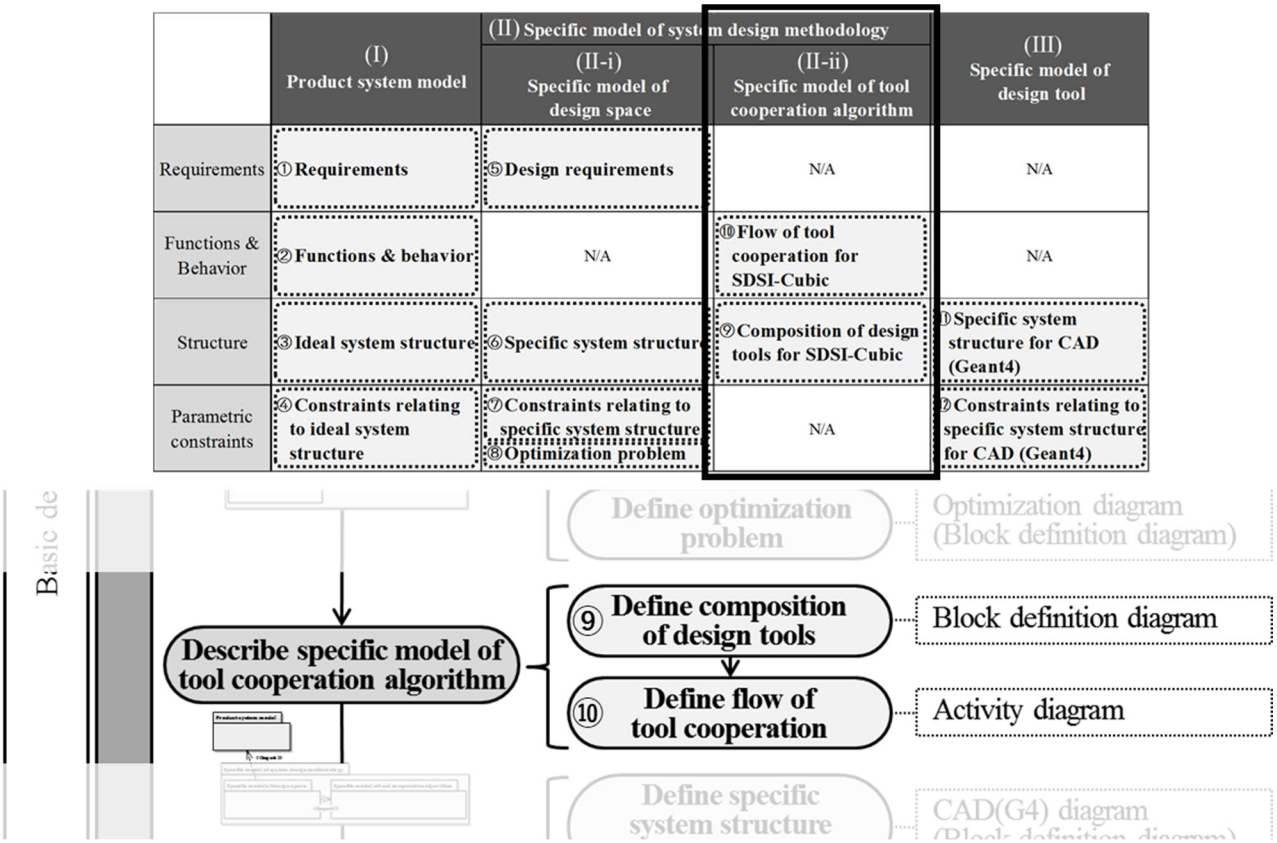


Fig. 3.28　Focus of this section.

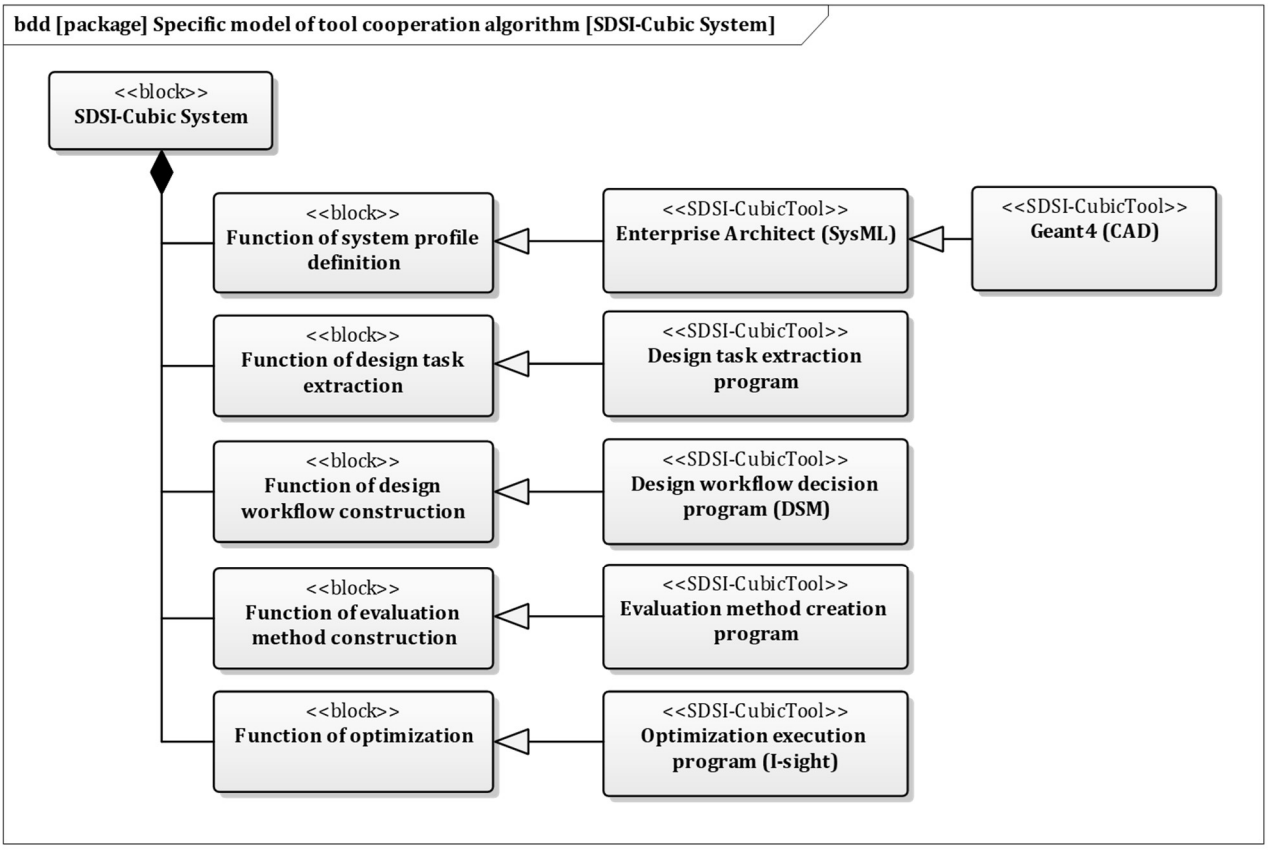


Fig. 3.29　Example of tool composition definition in specific model of design space.

置といった実体情報をモデル化するために、CAD(Geant4)と連携を行う。そのため、モデリングツールの一部として、Geant4 も記述している。

上記のように、設計ツールの構成を定義することができる。

3.3.4.2　設計ツールを連携するフローの定義

次に、設計ツールを連携するフローの定義を行う。記述はアクティビティ図を用いて行い、ツールが果たす機能とその流れを定義する。記述した例を、Fig. 3.30 に示す。Fig. 3.30 には、SDSI-Cubic 手法の機能の流れを踏襲し、記述している。また、CAD(Geant4)ツールを連携して 3 次元形状の構築も行うため、その機能も記述している。

上記のように、設計ツールが果たす機能とその流れを定義し、連携するフローを定義することができる。

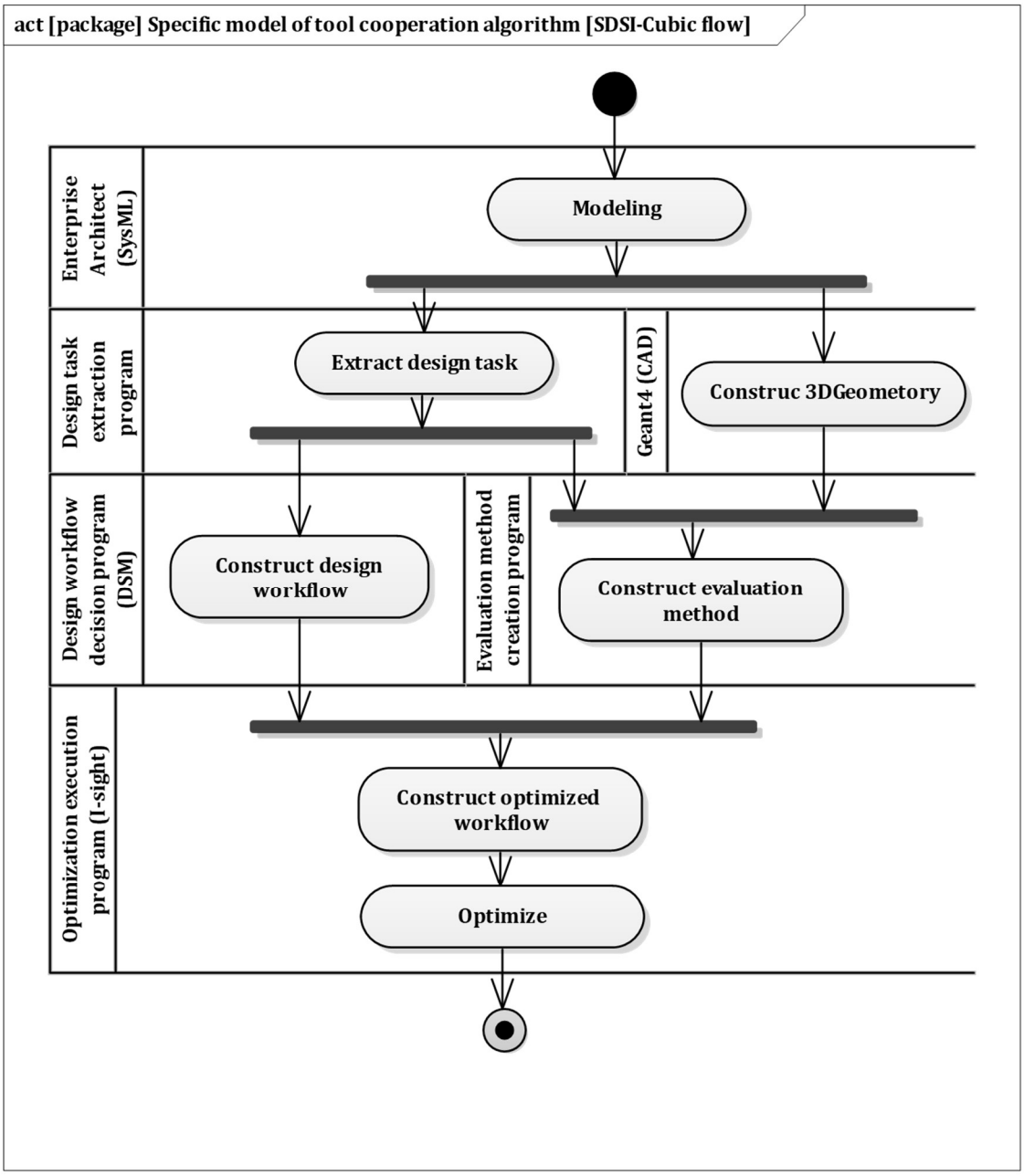


Fig. 3.30　Example of tool cooperation flow in specific model of design space.

以上、設計ツールの構成の定義、それらの設計ツールを連携するフローの定義を各記述方法に従って行うことで、ツール連携アルゴリズム固有モデルを記述することが可能である。ツール連携アルゴリズム固有モデルの記述方法が構築できたので、次に、設計ツール固有モデルの記述方法の構築を行う。

3.3.5　設計ツール固有モデルの記述方法の構築

ここでは、設計ツール固有モデルの記述方法の構築を行う。モデル記述方法全体の中での位置付けを、Fig. 3.31 に示す。設計ツール固有モデルを記述する目的は、設計ツールと連携するために、設計ツールに適した情報へと変換し、モデル情報を紐づけることである。本研究では、設計ツールとして CAD(Geant4)と連携し、詳細設計に繋がる形状や配置といった実体情報の記述を可能とする。そのために、CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義を行う。以下に、詳細を述べる。

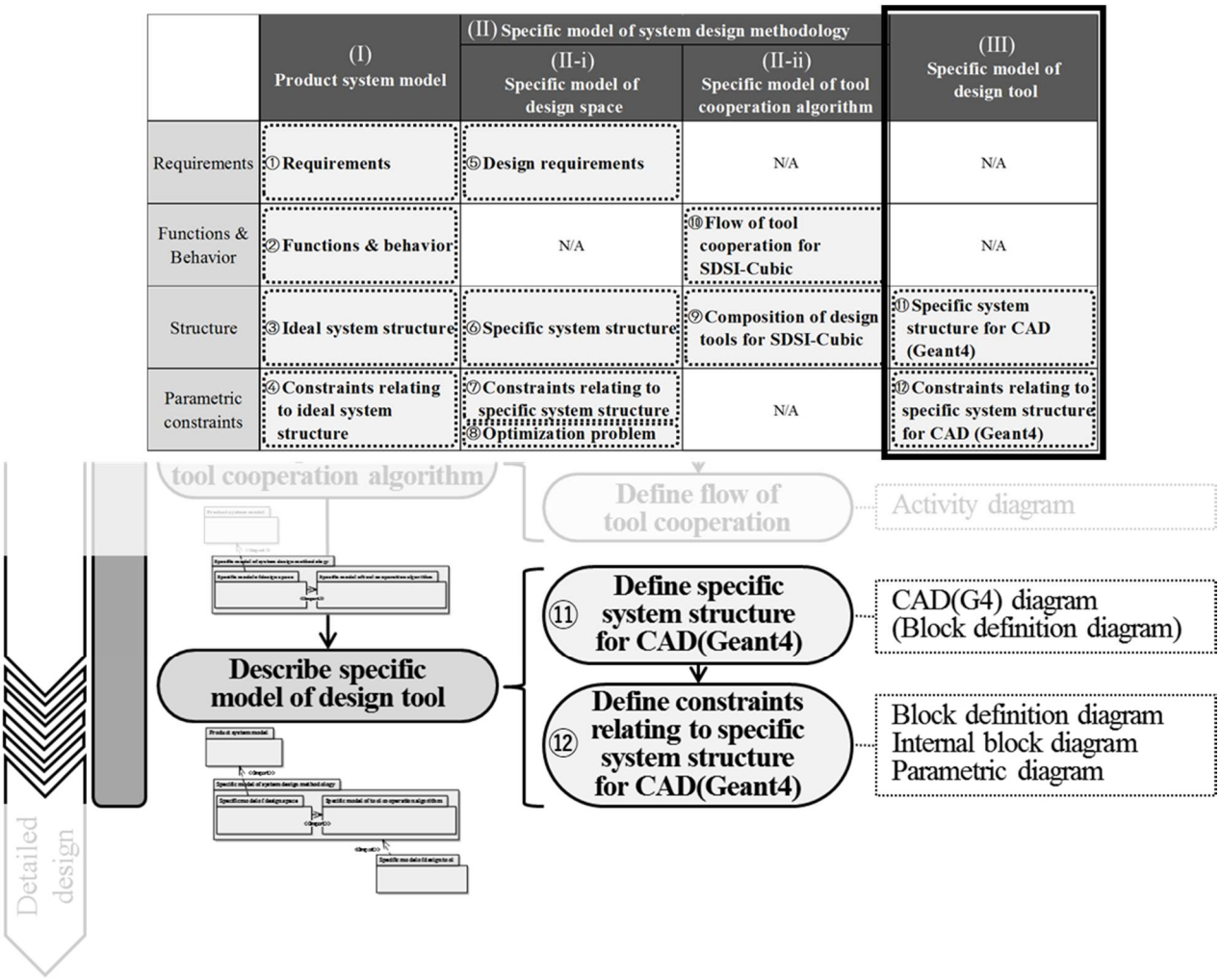


Fig. 3.31　Focus of this section.

3.3.5.1　CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義

まず、CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義を行う。SysML には、CAD のような形状や配置といった実体情報を定義するための記述方法は無い。そこで、CAD(Geant4)に適した情報を記述するためのステレオタイプ、および一連のステレオタイプをまとめたプロファイルを新たに定義することで、SysML を拡張し、CAD(Geant4)との連携を実現する。記述はブロック定義図を用いて行い、CAD(G4)図と呼ぶ。設計空間固有モデル内で既に記述されたブロック要素に対して、CAD(Geant4)を記述するためのステレオタイプを持つ要素を、汎化を用いて接続することとする。

Fig. 3.32 から Fig. 3.42 に、CAD(Geant4)を記述するためのステレオタイプをまとめたプロファイルの一部を示す。Geant4 の仕様を参考に、CAD の実体情報として、形状、物性、配置を記述できるようにした。Fig. 3.32 では、Geant4 の Geometry 情報として、大きく分けて、回転を表す G4RotationMatrix、配置情報を含む実体を表す G4PhysicalVolume、形状と材料情報を含む論理的な実体を表す G4LogicalVolume、形状情報を表す G4Solid のステレオタイプを記述している。Fig. 3.33 では、回転要素を表現するための、要素名、X、Y、Z 軸に対する回転角を記述するためのステレオタイプを記述している。Fig. 3.34 では、実体要素を表現するための、実体要素名、回転角、親要素の指定、X、Y、Z の座標などを記述するためのステレオタイプを記述している。Fig. 3.35 では、論理実体を表現するための要素名、材料、形状といった構成を示している。Fig. 3.36 では、材料情報を記述するための、データベースを利用するデフォルト材料指定、1 材料指定、複合材料指定の記述要素があることを示している。Fig. 3.37 では、デフォルト材料指定、1 材料指定に必要な情報を記述するためのステレオタイプを記述している。Fig. 3.38 では、複合材料指定に必要な情報を記述するためのステレオタイプを記述している。Fig. 3.39 では、形状の記述は、プリミティブ形状、ブーリアン形状の記述要素があることを示している。Fig. 3.40 では、ブーリアン形状に必要な、ブール演算の指定、演算する 2 つの形状の指定、相対座標位置などを記述するためのステレオタイプを記述している。Fig. 3.41 では、形状の基となる 25 種類のプリミティブ形状の記述要素があることを示している。Fig. 3.42 では、プリミティブ形状の 1 つである箱型形状に必要な、X、Y、Z 長の情報を記述するためのステレオタイプを記述している。ここでは示していないが、Fig. 3.42 のように、各プリミティブ形状を記述するためのステレオタイプも定義した。上記のステレオタイプを用いることで、形状や配置といった実体情報を記述することが可能である。

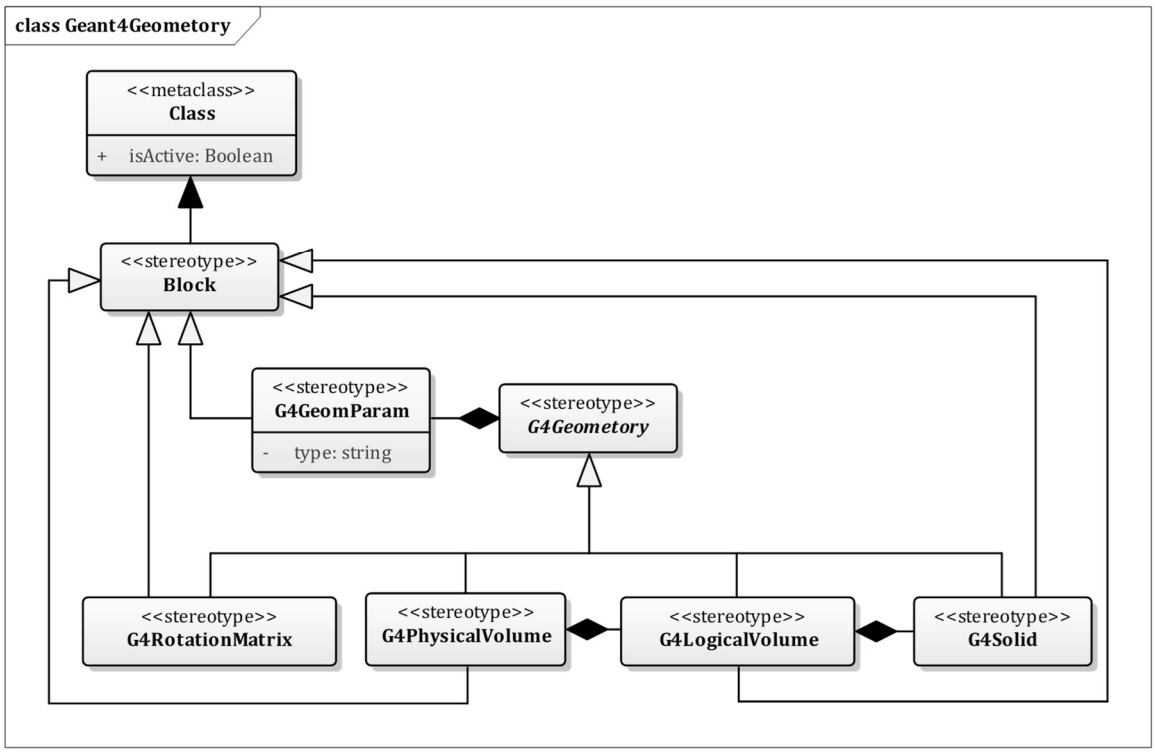


Fig. 3.32 Geant4 geometry profile of top level.

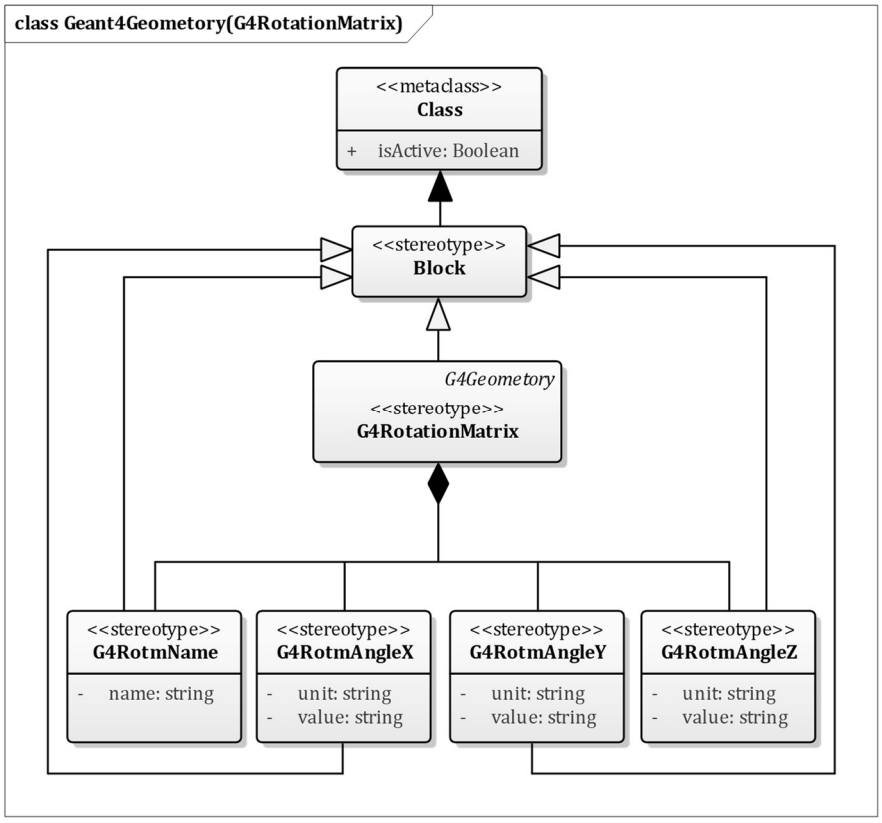


Fig. 3.33 Profile of rotation matrix.

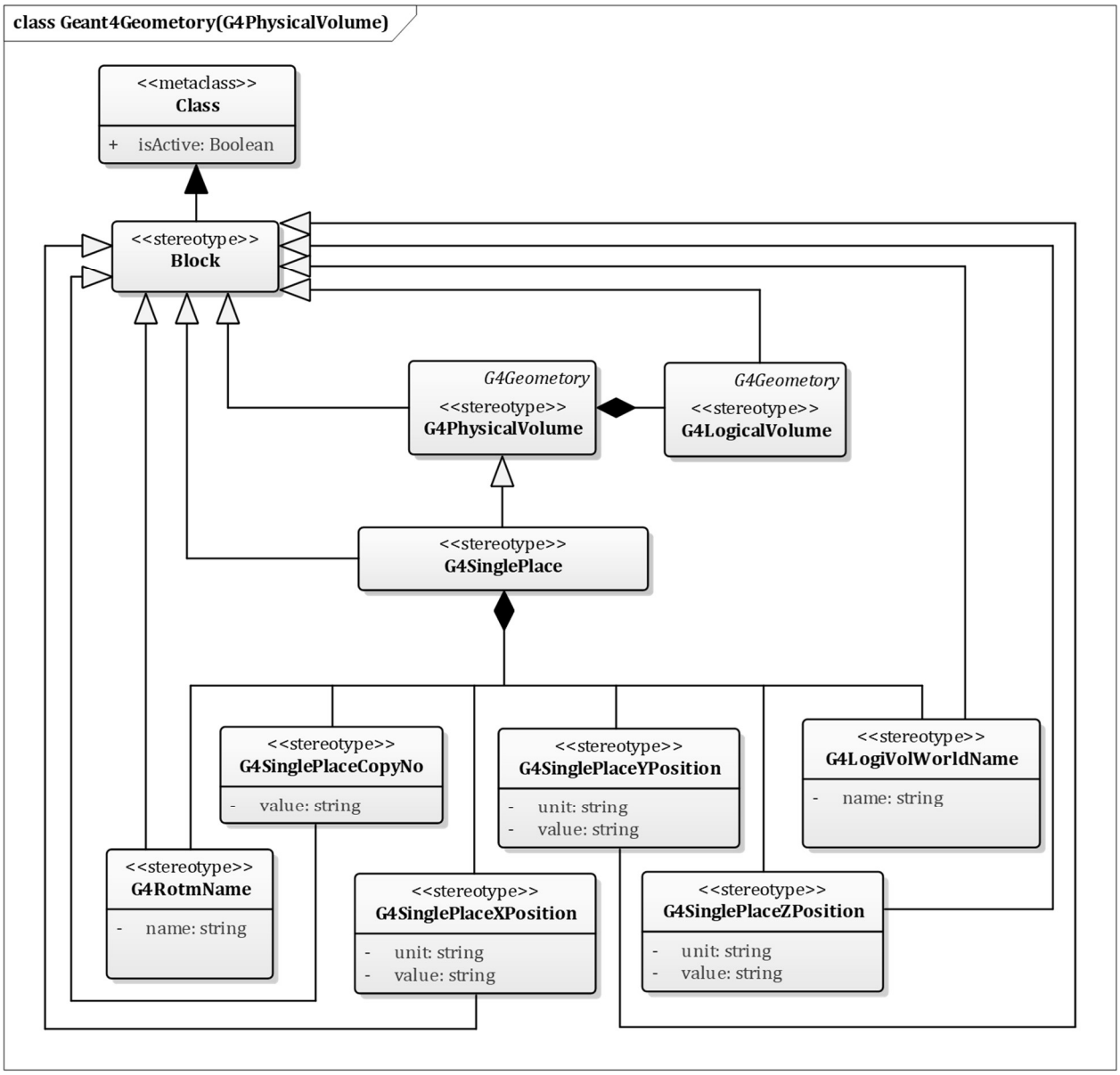


Fig. 3.34 Profile of physical volume.

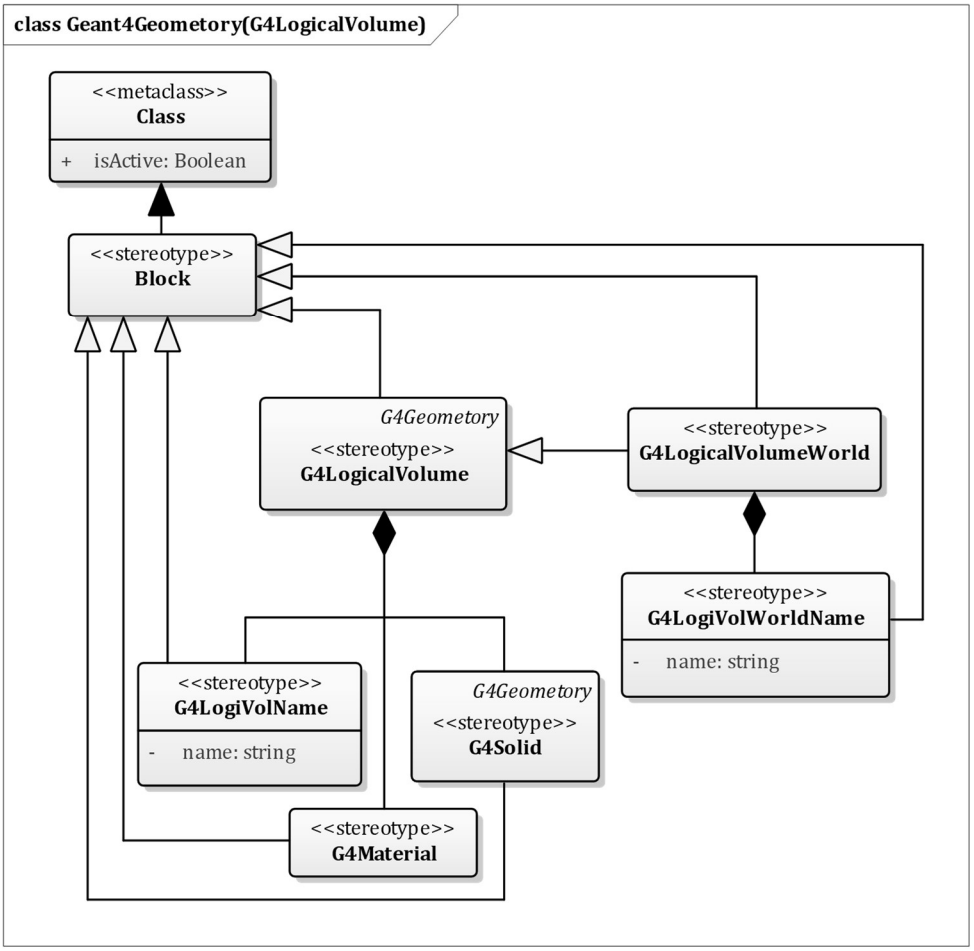


Fig. 3.35 Profile of logical volume.

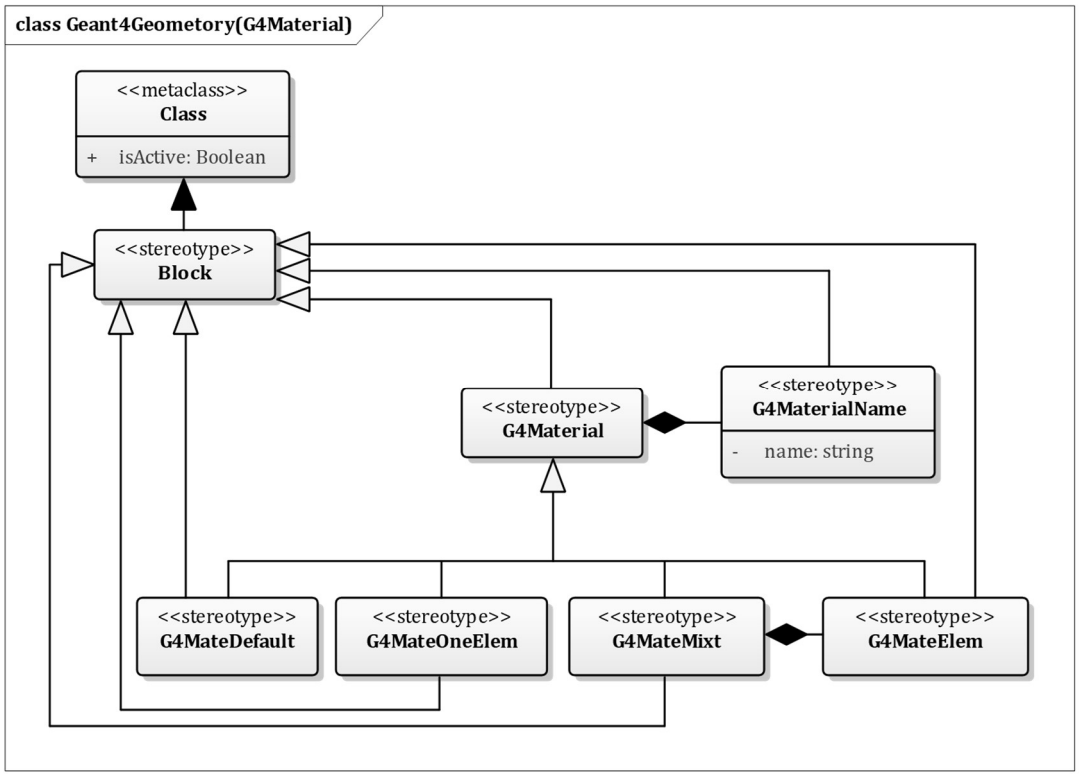


Fig. 3.36 Profile of material.

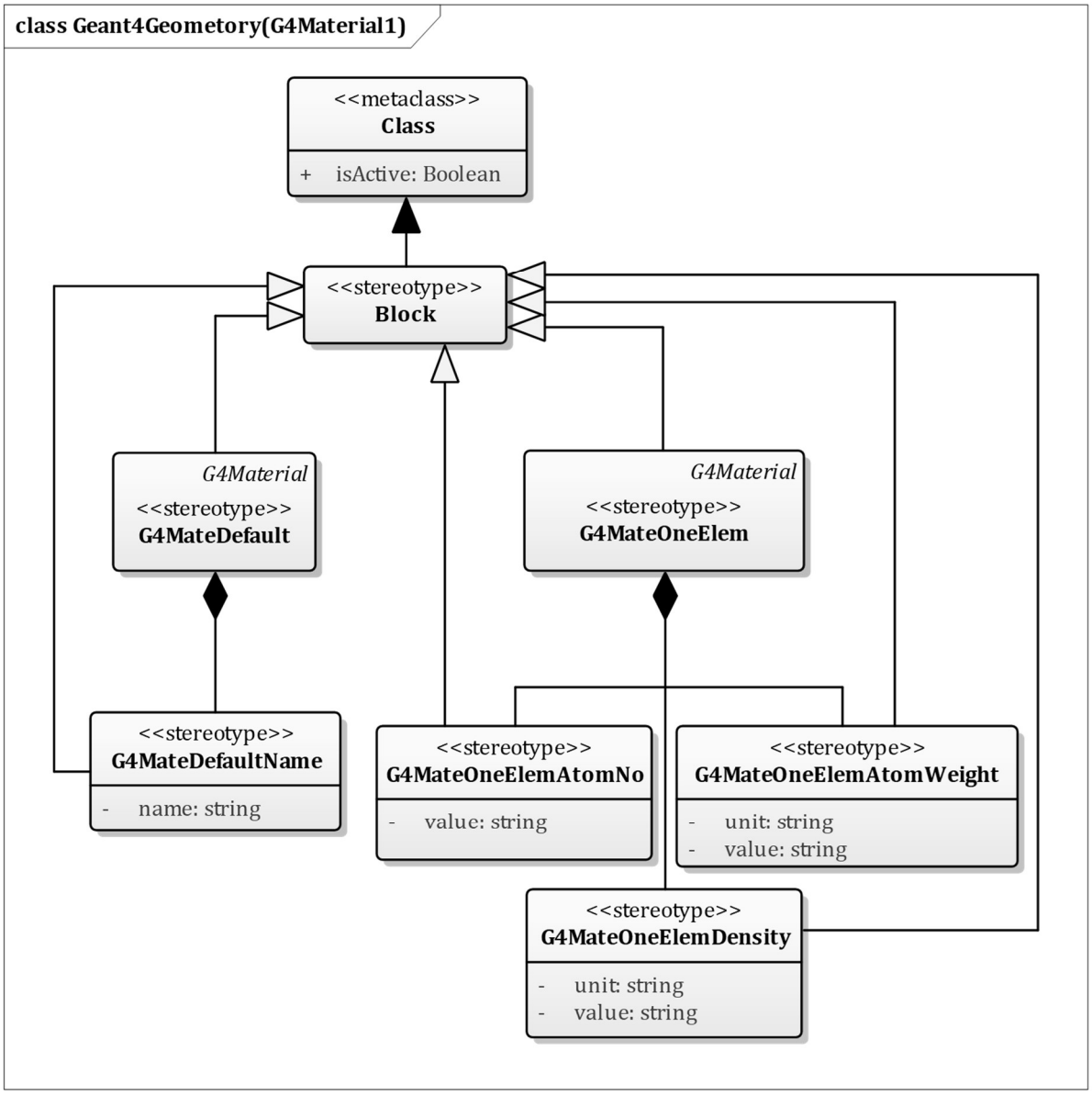


Fig. 3.37 A part of profile of material definition.

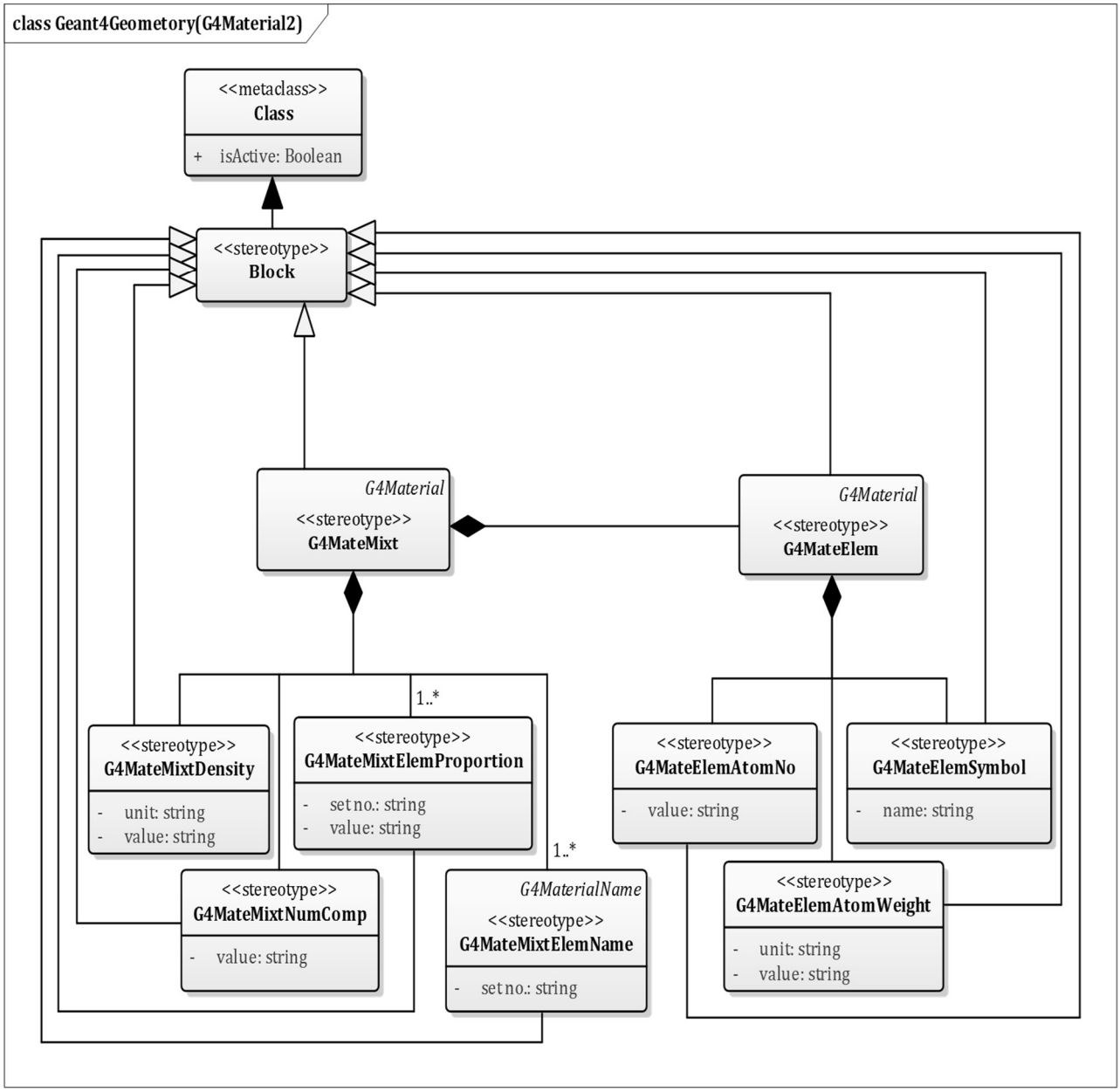


Fig. 3.38 A part of profile of material definition.

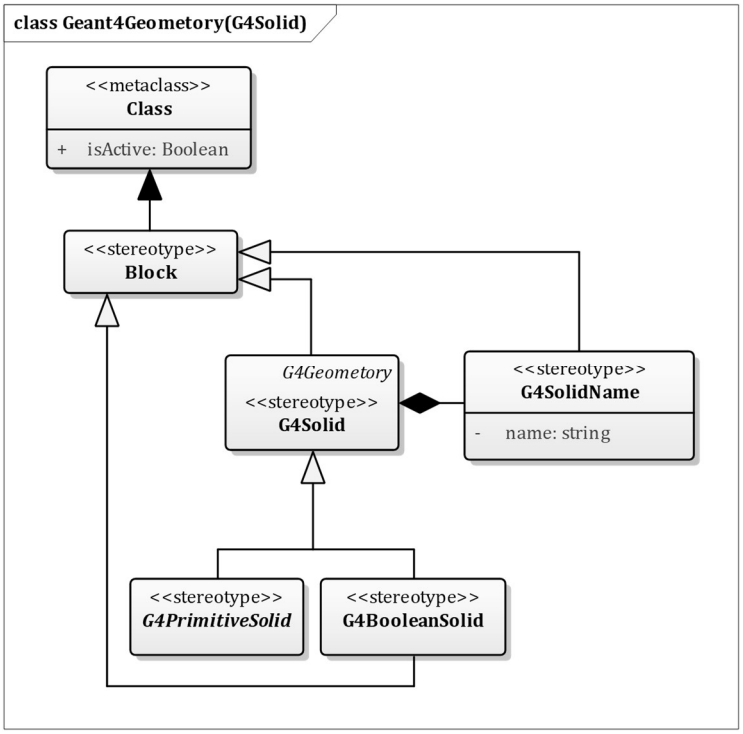


Fig. 3.39 Profile of solid shape.

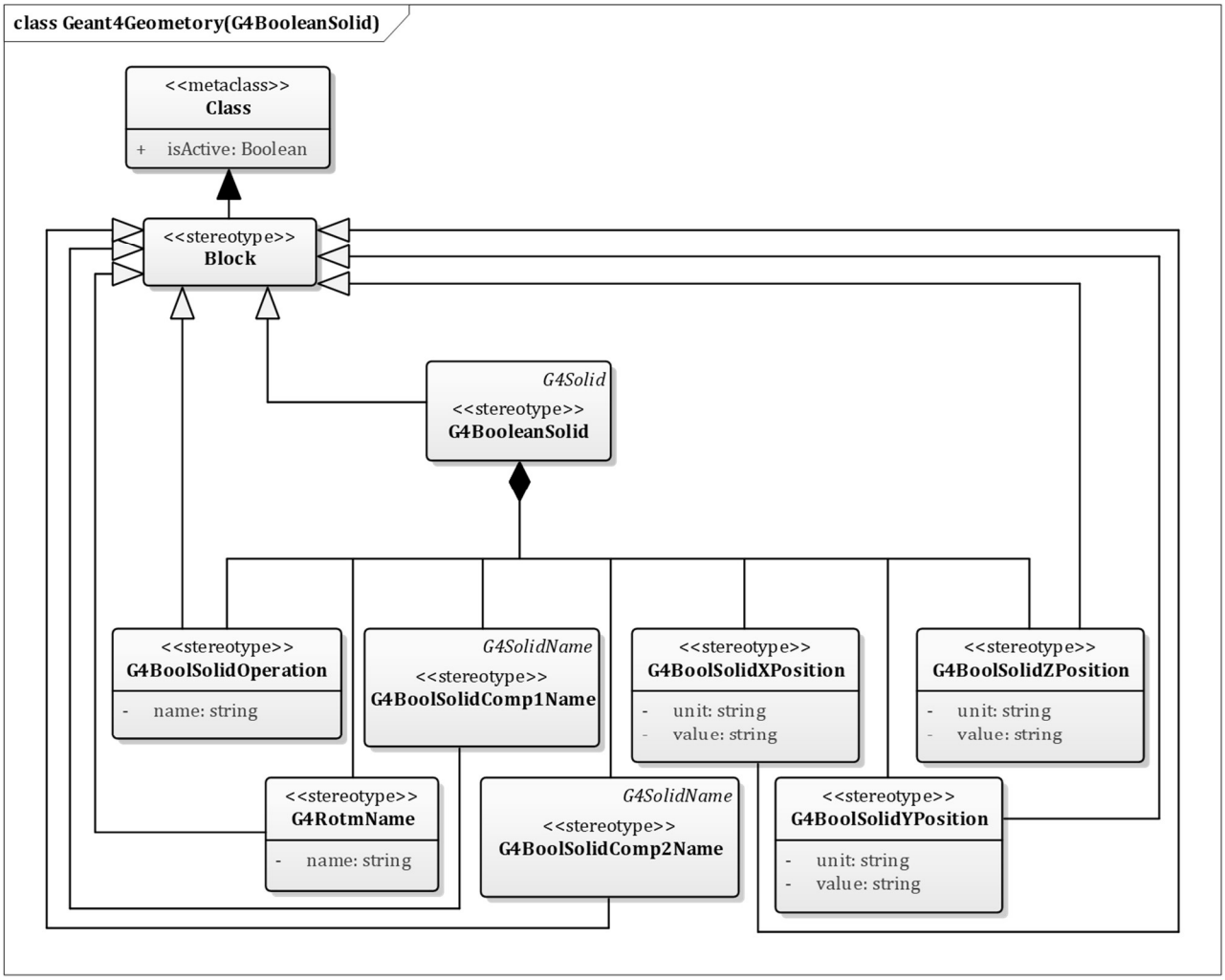


Fig. 3.40 Profile of Boolean solid shape.

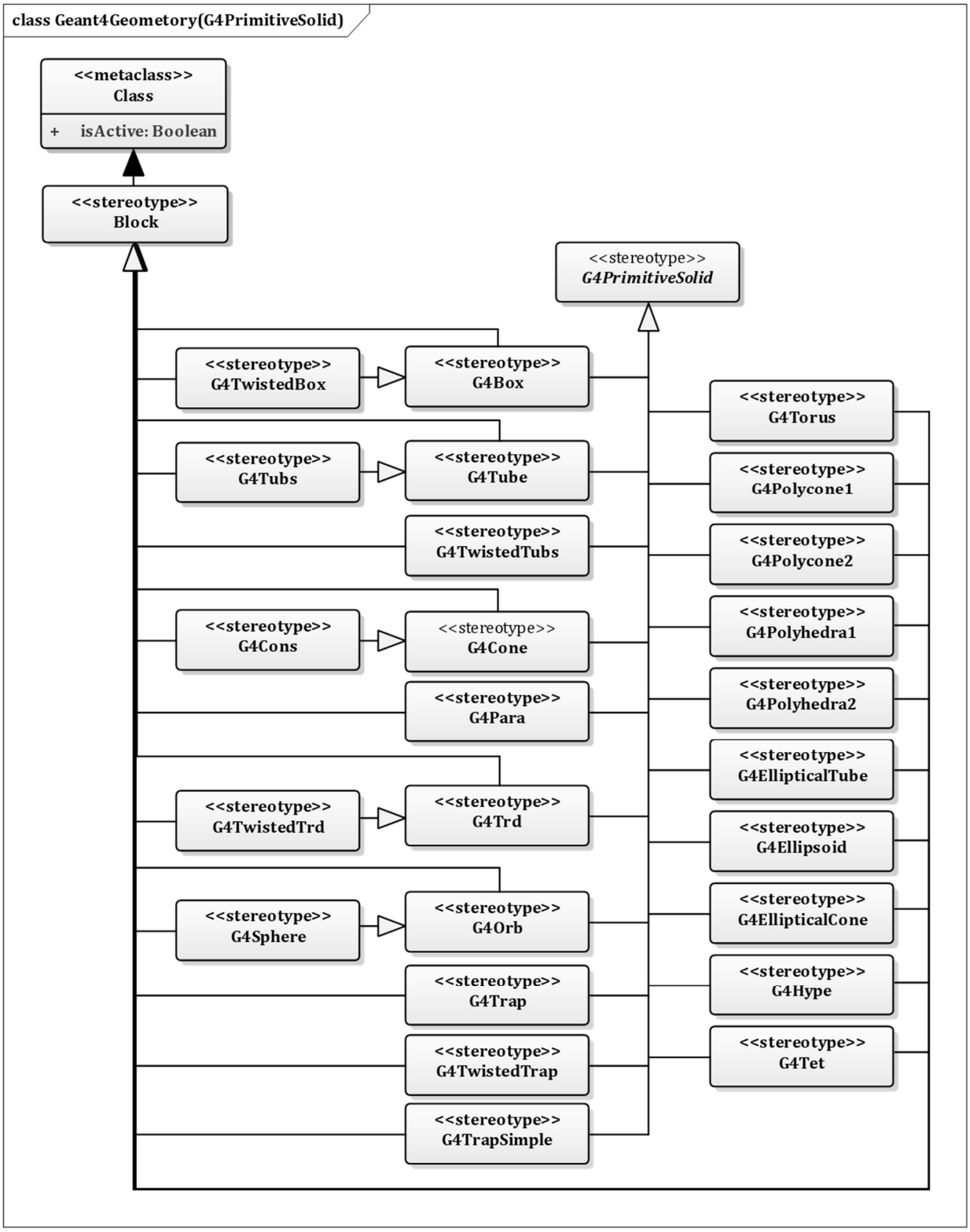


Fig. 3.41 Profile of primitive solid shape.

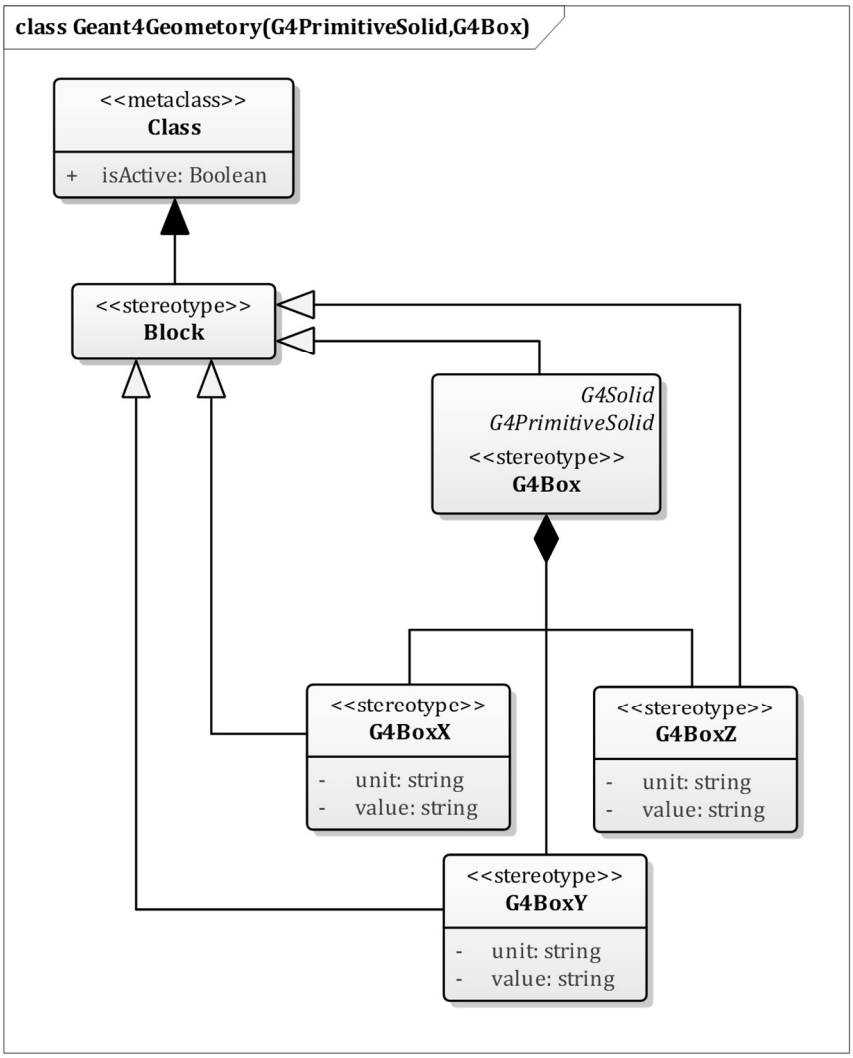


Fig. 3.42　Profile of box shape.

次に、上記のステレオタイプを用いて記述した例を、Fig. 3.43 に示す。Fig. 3.43 では、製品システムモデル、設計空間固有モデルで定義された要素を左側に示している。設計空間固有モデルで定義された直方体形状は、Geant4 では箱型形状に当たる。そこで、箱型形状を表す<<G4Box>>というステレオタイプを利用し、さらに<<G4Box>>が持つ各パラメータについてもステレオタイプを利用し、記述している。また、それぞれ新たに記述した要素について、設計空間固有モデルで定義された要素に対し、汎化接続を用いて、その関係を記述している。

このように、設計空間固有モデルで定義された情報に対し、設計ツールではどのような情報に該当するのか、つまり CAD(Geant4)のためのシステム構造を記述できる。さらに情報のトレーサビリティも確保できる。

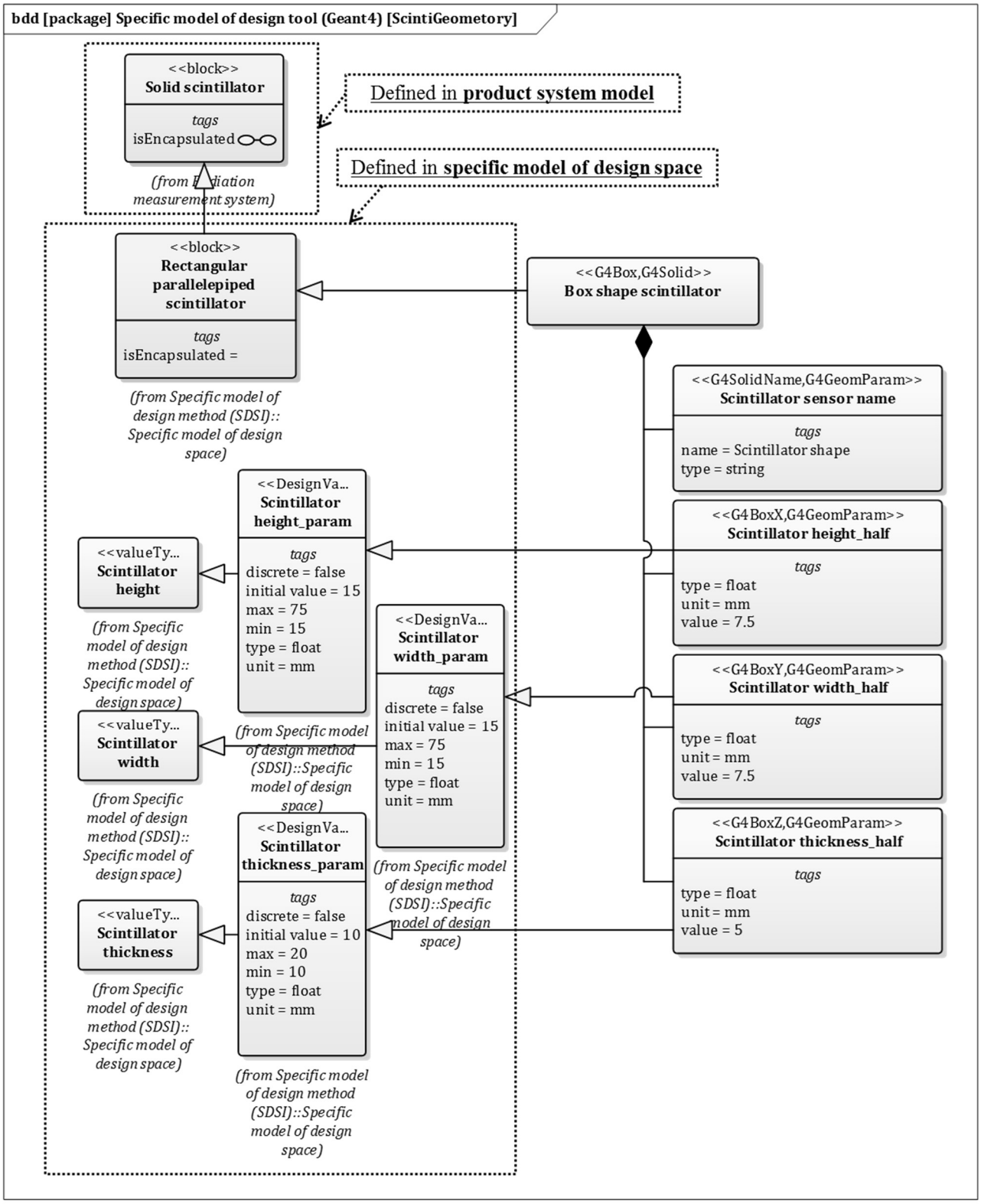


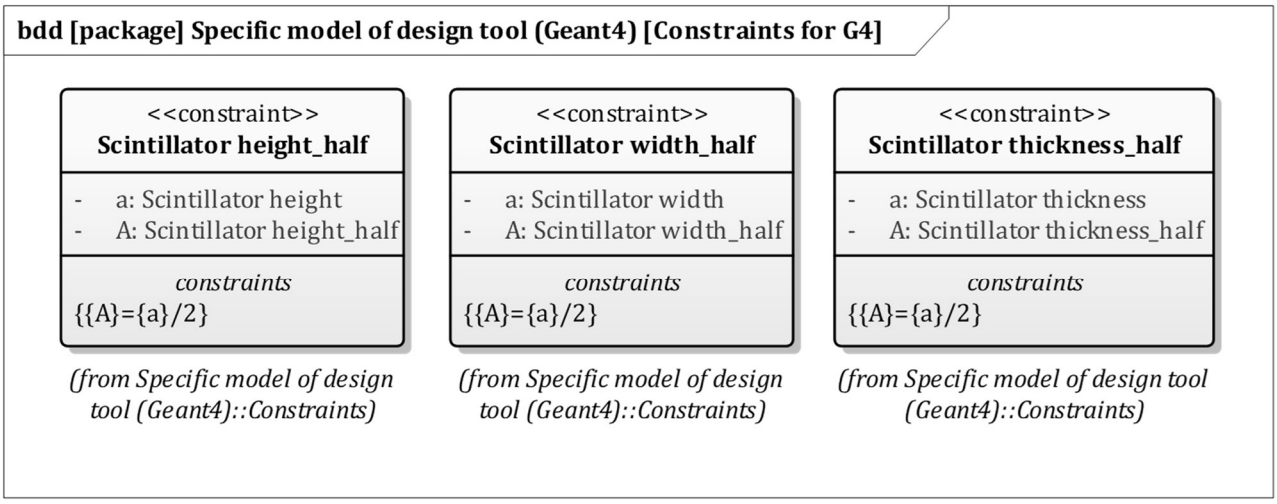
Fig. 3.43 Example of specific system structure for CAD(Geant4).

3.3.5.2　CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義

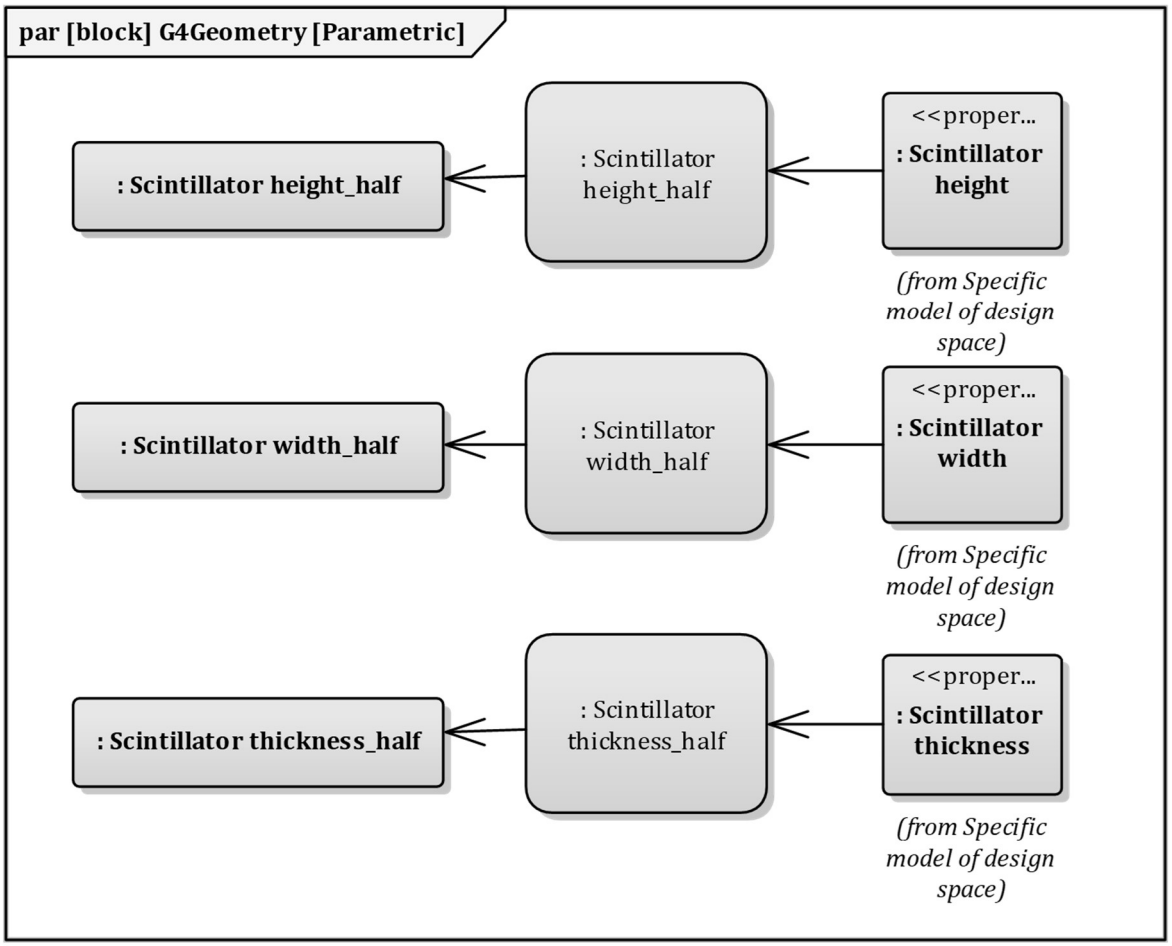
次に、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係を定義する。新たにシステム構造を定義したことで必要になった構造に関する制約関係の定義と、設計空間固有モデルとの間に生じる制約関係の定義がある。後者については、設計空間固有モデルで定義したパラメータの性質と、CAD(Geant4)におけるパラメータの性質が必ずしも一致しないからである。例えば、Geant4 において、箱型を表すためのパラメータは、箱型の重心を原点におき、X、Y、Z の座標によって形状を決定する。つまり、X、Y、Z 軸方向の辺の長さの二分の一の値で形状が決まる。もし、設計空間固有モデルで辺の長さでパラメータを既定していれば、そのパラメータの持つ性質は異なることになる。そこで、ブロック定義図、内部ブロック図、パラメトリック図を用いて、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係を記述する。基本的には、製品システムモデル、および設計空間固有モデルでの制約関係の記述方法と同様である。これまでの記述方法と異なる点は、パラメータの型を記述するために、<<ValueType>>の要素を利用していたが、ここでは、<<G4GeomParam>>の要素を用いる。ブロック定義図での制約式(<<constraintBlock>>)の記述、内部ブロック図、パラメトリック図での構造への割り当て、可視化の記述は、同様に行う。記述した例を、Fig. 3.44 に示す。Fig. 3.44 では、前述で例に挙げた、設計空間固有モデル内の直方体を表すパラメータと、Geant4 における箱型を表すパラメータ間の制約関係を記述している。

上記のように記述することで、設計空間固有モデルで定義したパラメータとの制約関係を記述することができる。また、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係は、製品システムモデル、および設計空間固有モデルで記述した構造に関する制約関係の記述と同様に行うことができる。

以上、CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義を各記述方法に従って行うことで、設計ツール固有モデルを記述することが可能である。これまでの検討結果により、製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの全ての記述方法を構築できた。すなわち、本研究で提案したモデリング概念に対する、モデル記述方法を構築することができた。



(a) Example of constraint definition.



(b) Example of parametric diagram.

Fig. 3.44 Example of constraints relating to specific system structure for CAD(Geant4).

3.4　モデル記述方法の構築結果と考察

本章では、第 2 章で構築したモデリング概念を基に、モデル記述方法を検討した。

まず、現状のモデル記述方法を整理し、課題を明らかにした。本研究で構築したモデリング概念を記述するためには、次の定義が必要である。製品システムに関しては、要求定義、機能、振る舞い定義、理想システム構成の定義、そのシステム構成に係る制約関係の定義である。システムデザイン手法に関しては、設計空間に関する要求定義、および設計空間の定義、ツール連携アルゴリズムの定義である。各設計ツールに関しては、各設計ツール用の情報の定義である。それらの定義に関して、現状技術を整理すると、全ての定義が可能なモデル記述方法は無いが、SysML の拡張機能を用いることで、本研究の目指すモデル記述方法の構築が可能であると推察された。そこで、SysML をベースにモデル記述方法を検討した。

SysML でモデルを記述するために、4 つのパッケージ単位でモデルを管理することとした。製品システムに関する情報を表現した製品システムモデル、設計空間に関する情報を表現した設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズムに関する情報を表現したツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツールに関する情報を表現した設計ツール固有モデルである。次に、実行可能なモデル記述方法とするためには、それぞれのモデルで何を記述するかという詳細な情報を決める必要がある。そこで、システムデザイン手法および設計ツールを選定した。その結果、本研究では、システムデザイン手法として SDSI-Cubic 手法を、形状や配置といった実体情報を連携するために設計ツールとして CAD(Geant4)を例に、モデル記述方法を構築することとした。

モデル記述方法の全体の流れとしては、次のような手順である。まず、概念設計のために製品システムモデルの記述を行う。製品システムモデルには、要求の定義、機能、振る舞いの定義、理想システム構成の定義、理想システム構成に関する制約関係の定義が含まれる。次に、基本設計および基本設計から詳細設計へと繋げるために、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの記述を行う。設計空間固有モデルには、設計空間に関する要求の定義、設計空間に関する具体的なシステム構造の定義、その具体的なシステム構造に関する制約関係の定義、最適化問題の定義が含まれる。ツール連携アルゴリズム固有モデルの中には、設計ツールの構成の定義、それらの設計ツールを連携するフローの定義が含まれる。設計ツール固有モデルの中には、設計ツール CAD(Geant4)のために具体化したシステム構造の定義、設計ツール CAD(Geant4)の情報

に変換するための制約関係の定義が含まれる。このような手順でモデルを記述するために、各定義をどのような記述方法で行うかを検討し、必要であればステレオタイプを追加して、それらの記述方法を構築した。

以上により、製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの全ての記述方法を構築でき、本研究で構築したモデリング概念に対する、モデル記述方法を構築することができた。また、CAD(Geant4)を用いることで、形状や配置といった実体情報についても、システムレベルでのモデリングを可能とすることができた。すなわち、現状の課題を解決しシステムデザインを一気通貫のモデルベースで行うことができる、モデリング手法を構築することができた。

3.5 結言

一貫したモデルベースのシステムデザインを実現するモデリング手法を構築するために、2 章で構築したモデリング概念を基に、モデル記述方法を検討した。以下に、結論を述べる。

1. モデル記述方法の現状技術が整理され、SysML をベースに本研究で目指すモデル記述方法が構築された。
2. 製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの 4 つのモデルを SysML を拡張して記述し、それらを紐づけることで一貫してモデルベースのシステムデザインが可能なモデル記述方法が構築された。
3. さらに、形状や配置といった実体情報については、パラメトリックに形状、配置を扱える CAD(Geant4)を用いて、システムレベルでの実体情報のモデリングが可能となった。

本章では、一貫したモデルベースのシステムデザインを実現するための、モデル記述方法を構築した。これにより、モデリング概念とモデル記述方法を合わせた、モデリング手法を構築することができた。次章では、構築したモデリング手法を用いて、ハードウェア、ソフトウェアからなる複雑なシステムであり、特にシステムデザインにおいて性能の支配因子である実体の考慮が不可欠である放射線計測システムを対象に、手法の検証、応用展開を行ったので、その結果について述べる。

参考文献

1) OMG (Object Management Group), “OMG Systems Modeling Language, Version 1.3”, http://www.omg.org/spec/SysML/1.3/PDF，(2012).
2) Richard J. Mayer，Capt. Michael K. Painter，Paula S. deWitte，“IDEF Family of Methods for Concurrent Engineering and Business Re-engineering Applications”, http://www.idef.com/downloads/IDEFFAMI.pdf，(1992).
3) 梅田靖，冨山哲男，吉川弘之，“機能設計支援のための FBS モデリングの提案”，精密工学会誌，Vol. 63，No. 6 (1997) 795-800.
4) Modelica Association，“Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling, Language Specification, Version 3.3 Revision 1”, https://www.modelica.org/documents/ModelicaSpec33Revision1.pdf，(2014).
5) OMG (Object Management Group), “OMG Unified Modeling Language, Version 2.5”, http://www.omg.org/spec/UML/2.5/PDF，(2015).
6) 株式会社テクノロジックアート,“基礎からはじめる UML2.4”, ソーテック社, (2013).
7) 児玉公信，“UML モデリングの本質”，日経 BP 社，(2004).
8) Tim Weilkeins，“Systems Engineering with SysML/UML”，Morgan Kaufmann，(2008).
9) Matthew Hause，“The SysML Modeling Language”，5th European Systems Engineering Conference，(2006).
10) Laurent Balmelli,“An Overview of the Systems Modeling Language for Products and Systems Development”，Journal of Object Technology，Vol. 6，No. 6 (2007) 149-177.
11) 長瀬嘉秀，中佐藤麻記子，株式会社テクノロジックアート，“SysML による組込みシステムモデリング”，技術評論社，(2011).
12) Sanford Friedenthal，Alan Moore，Rick Steiner，“A Practical Guide to SysML”，Morgan Kaufmann，(2009).
13) OMG (Object Management Group)，“SysML-Modelica Transformation”, http://www.omg.org/spec/SyM/1.0/PDF，(2012).
14) Christiaan J.J. Paredis，Yves Bernard，Roger M Burkhart，Hans-Peter de Koning，Sanford Friedenthal，Peter Fritzson，Nicolas F Rouquette，Wladimir Schamai，“An Overview of the SysML-Modelica Transformation Specification”，2010 INCOSE International Symposium，(2010).

15) 村田秀則,“パラメトリックモデルベースのシステムデザイン手法におけるシステム最適化に関する研究”，大阪大学，(2015).
16) Axel Reichwein，“Application-specific UML Profiles for Multidisciplinary Product Data Integration”，Universität Stuttgart，(2011).
17) 石橋耀,“IDEF : BPA のための手法”，オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学，Vol. 42，No. 4 (1997) 201-209.
18) 小林隆,“ビジネスプロセスのモデリングと設計”，コロナ社，(2005).
19) The National Institute of Standards and Technology,“Integration Definition For Function Modeling (IDEF0)”，http://www.idef.com/downloads/idef0.pdf，(1993).
20) Richard J. Mayer，“IDEF1 Information Modeling”，http://www.idef.com/downloads/IDEF1MR-part2.pdf，(1990).
21) Richard J. Mayer, Christopher P. Menzel, Michael K. Painter, Paula S. deWitte, Thomas Blinn, Benjamin Perakath,“Information Integration For Concurrent Engineering (IICE) IDEF3 Process Description Capture Method Report”，http://www.idef.com/downloads/Idef3_fn.pdf, (1995).
22) Michael M. Tiller,“Modelica による物理モデリング入門”，オーム社，(2003).
23) 大富浩一,“よくわかる「設計手法」活用入門”，日刊工業新聞社，(2016).
24) Geant4 Collaboration，“Introduction to Geant4, Version: geant4 10.3”，http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/IntroductionToGeant4/fo/BookIntroToGeant4.pdf，(2016).
25) J. Allison，K. Amako，J. Apostolakis，H. Araujo，P. Arce Dubois，M. Asai，G. Barrand, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytracek, G. A. P. Cirrone, G. Cooperman, G. Cosmo, G. Cuttone, G. G. Daquino，M. Donszelmann，M. Dressel，G. Folger，F. Foppiano，J. Generowicz，V. Grichine，S. Guatelli，P. Gumplinger，A. Heikkinen，I. Hrivnacova，A. Howard，S. Incerti, V. Ivanchenko，T. Johnson，F. Jones，T. Koi，R. Kokoulin，M. Kossov，H. Kurashige，V. Lara, S. Larsson, F. Lei, O. Link, F. Longo, M. Maire, A. Mantero, B. Mascialino, I. McLaren, P. Mendez Lorenzo，K. Minamimoto，K. Murakami，P. Nieminen，L. Pandola，S. Parlati, L. Peralta，J. Perl，A. Pfeiffer，M. G. Pia，A. Ribon，P. Rodrigues，G. Russo，S. Sadilov, G. Santin, T. Sasaki, D. Smith, N. Starkov, S. Tanaka, E. Tcherniaev, B. Tome, A. Trindade, P. Truscott，L. Urban，M. Verderi，A. Walkden，J. P. Wellisch，D. C. Williams，D. Wright,

H. Yoshida,“Geant4 Developments and Applications”，IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 53，No. 1 (2006) 270-278.

26) 千代倉弘明,“ソリッドモデリング:CAD/CAMのための基礎技術”, 工業調査会, (1985).

27) ISO (International Organization for Standardization), “ISO/IEC 14772-1”，(1997).

28) Ana Luísa Ramos，José Vasconcelos Ferreira，Jaume Barceló，“Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems”，IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews，Vol. 42，No. 1 (2012) 101-111.

29) 独立行政法人　情報処理推進機構,“モデルベースシステムズエンジニアリング導入の手引き”，http://www.ipa.go.jp/files/000033609.pdf，(2013).

30) 西村秀和, 藤倉俊幸,“モデルに基づくシステムズエンジニアリング”, 日経BP社, (2015).

31) 天谷賢治，“工学のための最適化手法入門”，数理工学社，(2008).

第 4 章　放射線計測システムのシステムデザインへの本モデリング手法の適用結果

4.1　緒言

第 2 章で、概念設計、基本設計、および詳細設計に繋がるシステムデザインのプロセスを一貫してモデリングするためのモデリング概念が構築され、第 3 章で、その概念に対して製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの 4 つのモデルで記述するモデル記述方法が構築された。これらにより、システムデザインを一貫した概念に基づき、モデルベースで行うためのモデリング手法が構築された。

本章では、構築されたモデリング手法を用いて、放射線計測システムのモデリングを行う。放射線計測システムは、ハードウェア、ソフトウェアからなる複雑な製品システムであり、特にシステムデザインにおいて性能の支配因子である実体の考慮が不可欠である。これにより、本モデリング手法によるシステムデザインプロセスでの一貫したモデルベースデザインを検証した。以下に、その結果を述べる。

4.2　放射線計測システムの背景と本モデリング手法の適用理由

まず、放射線計測システムの背景について述べる。

約 46 億年前に地球が誕生した時、宇宙空間に存在した様々な物質とともに、放射性物質も地球に取り込まれた。つまり、我々の身の回りには、ごく普通に放射線が飛び交い、地球上いたる所に放射性物質が存在している。人体や食物中にも放射性物質は微量に存在する。また人類は、宇宙線と呼ばれる宇宙からの放射線照射も受けている。これらの放射線を総称して自然放射線という。

地球上には、人工的な放射性物質も存在する。放射性物質は工業、農業、医療など様々な分野で効果的に広く利用されている。特に、近年の世界的なエネルギー需要の増大に伴い、Fig. 4.1 に示すように原子力発電所が数多く建設されている [1)]。原子炉内では大量の放射性物質が生成され、この中には自然界に存在しない放射性物質も含まれる。通常、原子力発電所に使用される核燃料は厳重に処理されており、放射性物質が外界へ漏れ出さないように管理、運用されている。

しかし、2011 年、日本は東日本大震災という未曽有の大震災に見舞われ、地震、津波により甚大な被害を受けた。加えて、福島第一原子力発電所にて、大量の放射性物質が漏洩する事故が発生し、放射性物質の飛散に伴う外部被ばくや内部被ばくによる人体への影響

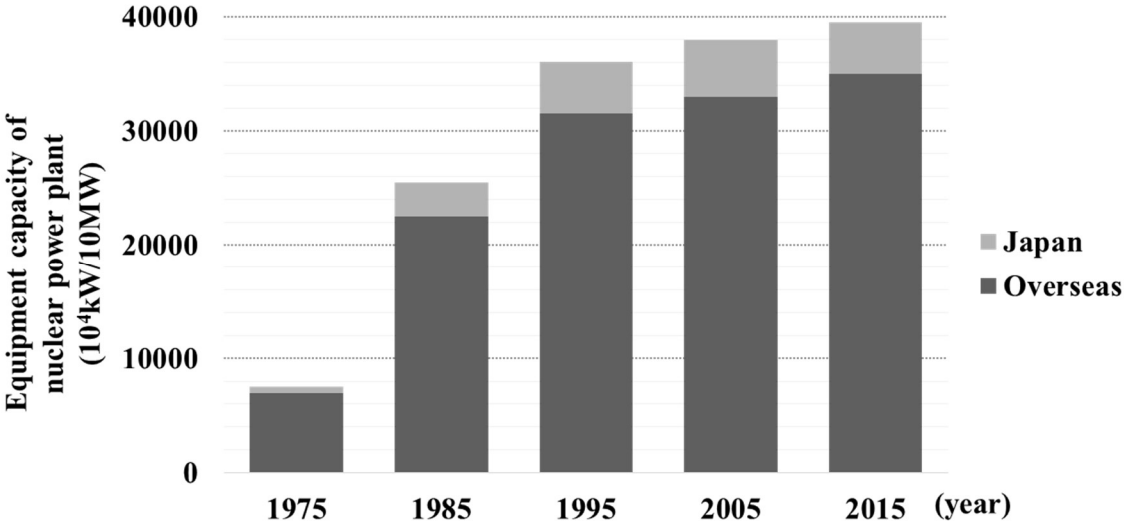


Fig. 4.1　Equipment capacity changes of nuclear power plants in the world[1].

が問題となった。限度を超える放射線の影響を受けた場合、DNA 鎖の切断、塩基への損傷などが起こる。もちろん、元来人間は DNA の修復能力を持ち合わせている。しかし、もしこの能力に不都合が生じた場合、放射線が癌などの発症原因となる可能性があるため[2]、外部被ばくや内部被ばくにより、どの程度人体が影響を受けているかを把握しておくことは重要である。

放射線の影響を把握するためには、計測を行う必要がある。外部被ばくによる影響を把握するためには、定点計測などの空間放射線量の計測が行われる。内部被ばくによる影響を把握するためには、食物の放射能濃度計測が行われる。事故後、行政機関や専門機関、業者によって、定点計測や食物検査などが行われ、現在も引き続き実施されている。しかしそこで明らかになった課題は、住民が知りたい時に、身の回りの状況を把握でき、安心、安全を確認できるというところまでは至っていなかったことである。

したがって、身の回りの安心、安全を確認できるような、可搬型で放射線量および放射能濃度の計測が可能な、高コストパフォーマンス放射線計測システムが求められている。これまでも数多くの放射線計測器が研究、開発されているが、高性能を求めるあまり高価格になっているもの、低価格で性能が疎かになっているものなど、住民の要求に応えられていないという課題がある。

放射線計測システムは、ハードウェア、ソフトウェアからなる複雑な製品システムであり、性能やコストなどのトレードオフを考慮する必要がある。つまり、住民の要求に応えることができる高価値なシステムを構築するためには、システムデザインを行うことが必

要である。また、放射線計測システムに関わる物理的な計測方式等は確立された技術となっているが、その用途、要求仕様によって、形状や材料など、そのシステムの実現方法は大きく変わる。つまり、システムデザインを行う上で、物理的な性能の支配因子である実体の考慮は必要不可欠である。そこで、実体を考慮し、かつ改良設計や設計変更に対応するためにも、設計情報をモデルで表現し、モデルベースでシステムデザインを行うことが必要である。

そこで本研究では、放射線計測システムのシステムデザインに対して、本モデリング手法を適用し、一貫したモデルベースのシステムデザインを検証した。以下に、その結果を述べる。

4.3 放射線計測システムのシステムデザインにおけるモデリング結果

4.3.1 企画(要求仕様)の概要

ここでは、システムデザインプロセスの概念設計へと入力される現状技術の課題とそれを解決する要求仕様について述べる。

現在市販されている主な放射線計測器をまとめたものが Table 4.1 である。これらは放射線のうち、主に γ 線を検出する計測器であり、使用用途によって使い分けられている。LB200(BERTHOLD 社製)と CAN-OSP-NAI、SEGe(Canberra 社製)は放射能濃度計測器である。また、検出方式としては、LB200 と CAN-OSP-NAI が NaI(Tl)シンチレーションカウンタで、SEGe が Ge 半導体検出器となっている。LB200 は、放射能濃度は計測できるものの、スペクトル分析ができず、放射性物質の核種判別はできない。CAN-OSP-NAI、SEGe は高精度であり、スペクトル分析ができるため、核種の判別が可能である。また、SEGe は非常に分解能が高く、より高度で高精度な分析が可能である。しかし、この 2 機種は遮蔽材の Pb が厚くかつ大きく、高重量となっており、装置は据え置きとなる。また、操作は専門性が高く、価格も高価であるため、専門家や公的機関の精密検査・分析用に用いられている。EMF211(EMF Japan 社製)は、検出方式に NaI(Tl)シンチレーションカウンタを採用しており、本体のみでは空間放射線量を、遮蔽材 Pb を用いることで放射能濃度の計測が可能である。また、スペクトル分析により、核種の判別が可能である。しかしながら、遮蔽材 Pb が非常に高重量で持ち運びできないため、使用場所が制限される。また、高価である。RDTX-PRO(Scoshe 社製)、TGS-131(HITACHI ALOKA 社製)、PA-1000 Radi(HORIBA 社製)は空間放射線量計であり、持ち運び可能である。しかし、表示は放射線量のみであり、

核種の判別はできない。RDTX-PRO は、Si 半導体検出器で、I-Phone などにアプリをインストールし、接続することで計測が可能である。検出器のみの販売であるため、非常に安価であるが、センサが小型であるため、精度は低い。TGS-131 は、GM 計数管で、表示もわかりやすく扱いやすいため、広く普及している。しかし、一定期間で性能が落ち、ガス管の交換などメンテナンスが必要であり、低寿命という問題がある。Radi は、CsI(Tl)シンチレーションカウンタを採用しており、CsI(Tl)シンチレータに潮解性がなく高寿命であるため、コストパフォーマンスが良い。

以上を整理すると、現状の放射線計測器の課題としては、持ち運び可能で、空間放射線量と放射能濃度の両計測が可能な計測器がないこと、放射能濃度計測と核種判別が可能な計測器は非常に高価であり、高重量であることなどが挙げられる。

そこで、空間放射線量と放射能濃度の計測、核種の判別ができ、また、低価格、軽量、小型である、高コストパフォーマンスな計測器の実現が求められる。具体的な要求仕様について、Table 4.2 に示し、以下に述べる。

Table 4.1　Comparison of radiation measurement instruments.

Manufacture	BERTHOLD	Canberra		EMFJapan	Scoshe	HITACHI ALOKA	HORIBA
Model	LB200	CAN-OSP -NAI	SEGe	EMF211	RDTX-PRO	TGS-131	PA-1000 (Radi)
Measurement object	Radioactivity			Radiation			
Output	Value	Spectrum &Value	Spectrum &Value	Spectrum &Value	Value	Value	Value
Detector	NaI(Tl) scintillators	NaI(Tl) scintillators	Ge semiconductor	NaI(Tl) scintillators	Si semiconductor	GM tube	CsI(Tl) scintillators
Detector size	5cm^3	100cm^3	?	350cm^3	0.12cm^3	ϕ20mm	2.3cm^3
Detection limit (Bq/kg)	20 (/15min)	25 (/10min)	?	6.4 (/10min)			
Measuring range (uSv/h)				0.0001～50	0.01～10000	0～300	0.001～9.999
Energy range (keV)		60～2000	40～10000	0.03～3000	60～		
Energy resolution (%)		7.5 (/662keV)	2 (/662keV)	6.5 (/662keV)			
Measurement error (%)	?	±20	?	±5 (/under 20uSv/h)	±45 (/0.4uSv/h)	?	±3.3 (/0.3uSv/h)
Weight (kg)	10	166	1100	1.5 + 240(Pb)	0.2	1.4	0.175
Price (yen)	1,500,000	5,150,000	?	1,500,000	30,000	283,500	125,000

空間放射線量の計測範囲としては、身近な放射線量を計測することが求められるため、日本における自然放射線量が 0.05～0.1μSv/h 程度であること、福島の高線量な箇所で 20μSv/h 程度であったことから、0.01～30μSv/h が計測範囲として求められる。外部被ばくや内部被ばくの人体への影響を確認するため、放射性物質の核種の判別は不可欠である。地球上には ^{40}K や ^{226}Ra など自然界にも放射性物質が存在し、^{137}Cs や ^{134}Cs などの原発由来の放射性物質と区別することが求められる。また、γ 線の持つエネルギーが異なるため、同じ放射線量や放射能濃度であっても、人体への影響度は異なる。そこで、本計測には、エネルギースペクトルが取得可能で、かつ核種判別が可能であることが求められる。^{137}Cs は 662keV、^{134}Cs は 600keV と 800keV、^{40}K は 1460keV のエネルギーを持つことから、γ 線エネルギー計測範囲としては、0.05～2000keV とする。また、^{137}Cs の 662keV と ^{134}Cs の 600keV、800keV が非常に近いエネルギーを持つ γ 線であり、エネルギースペクトルがガウス関数のような形状になることを考慮し、これらのエネルギースペクトルを分離するために、エネルギー分解能は 10%以下であることが求められる。感度に関して、短時間、小誤差で測定することが求められていること、現状技術の比較から、放射線量については、1μSv/h において 1300cpm(counts per minute)、放射能濃度については、100Bq/kg に対し 40cpm を目標

Table 4.2　List of requirements specification.

Item		Content
1. Measuring object		**Radiation(μSv/h), Radioactivity(Bq/kg)**
2. Efficiency		
	(1) Measuring range	**Radiation : 0.01μSv/h～30μSv/h**
	(2) Measuring range of γ-rays energy	**0.05～2000keV [Cs-137(662keV),Cs-134(605keV),Cs-134(796keV)]**
	(3) Energy resolution	**Within 10%　[FWHM of Cs-137(662keV)]**
	(4) Sensitivity : Radiation	**1300CPM/(1μSv/h)**
	(5) Sensitivity : Radioactivity (30min)	**40CPM/(100Bq/kg) [Radiation of Background:0.01μSv/h]**
	(6) Detection limit	**Under 50Bq/kg**
3. Weight		**Under 10kg**
4. Measuring time		
	(1) Radtiation	**Within 1min**
	(2) Radioactivity	**Within 60min (100Bq/kg, Radiation of Background:1μSv/h)**
5. Price		**Under 1/3 of the current measuring instruments**

とする。放射線量は 1 分計測で、放射能濃度は 30 分計測で、カウント数が 1000counts を超えるため、誤差が±3%以内になる。また、計測時間に関しては、手軽に計測し、スクリーニングを行えるようにするため、60 分以内とする。放射能濃度の計測については、国の汚染米の基準が 100Bq/kg であり、その基準を超えるかどうかを判断することが求められているため、50Bq/kg 以下の検出限界が求められる。重量としては、持ち運びし、様々な計測場所に対応できるようにするため、遮蔽材を含め、10kg 以下であることが求められる。価格は、多くの人が購入しやすく広く普及できるように、現行計測器価格の 1/3 程度の約 30 万円程度であることが求められる。

以上のような要求仕様を入力とし、放射線計測システムのシステムデザインに関するモデリングを行う。

4.3.2 製品システムモデルのモデリング結果と考察

ここでは、放射線計測システムの概念設計にあたる製品システムモデルを表現するために、モデリングを行う。モデリングは、要求の定義、機能、振る舞いの定義、理想システム構成の定義、理想システム構成に関する制約関係の定義の順で行い、モデル記述方法に従ってモデルを記述する。

4.3.2.1 放射線計測システムに関する要求の定義とモデル記述

まず、本研究の設計対象である放射線計測システムの範囲を定義し、対象システムと外部とを明確にする。本研究では、対象システムを H-SRBC(Handy-Smart Radiation & Becquerel Counter)[i)]と呼ぶ。H-SRBC の使用者としては、主婦などの住民、給食センター、役所職員、除染業者などが想定され、これまでより身近な放射線量や放射能濃度を手軽に計測できることが求められている。また、求められている本計測システムの位置づけとしては、現地での簡易計測、精密検査の前段階の事前確認、スクリーニング用途である。そこで、H-SRBC の周辺環境としては、屋内での使用に関する屋内環境、屋外での使用に関する屋外環境、測定の際に存在する自然放射線と原発由来の放射線を合わせたバッググラウンド放射線、測定器に入力される入力電圧、使用環境下の温度、湿度、測定器に付着する水分、測定器

[i)] H-SRBC は、Handy-Smart Radiation & Becquerel Counter の略で、本研究の設計対象である放射線計測システムの固有名称である。以後、一般的な放射線計測システムと区別するために、H-SRBC の名称を使用する。

に与えられる振動、傾斜が考えられる。

福島原発事故による放射性物質の問題で考慮しないといけないことは、食品などに放射性物質が含まれた状態で体内に摂取し､内部被ばくを引き起こす可能性があることである。これは、事故により放射性物質が飛散しているため、土壌などに堆積し、食物に吸収されてしまう可能性を考慮している。また、土壌などに堆積した放射性物質が自然現象により移動し、高放射線量のホットスポットを形成する可能性もある。そこで、測定対象としては、外部ひばくの影響を確認するために空間放射線と、内部被ばくの影響確認やホットスポットを調査するために、食品や土壌とする。

以上の情報を整理し、コンテキスト図を用いて記述した結果を、Fig. 4.2 に示す。

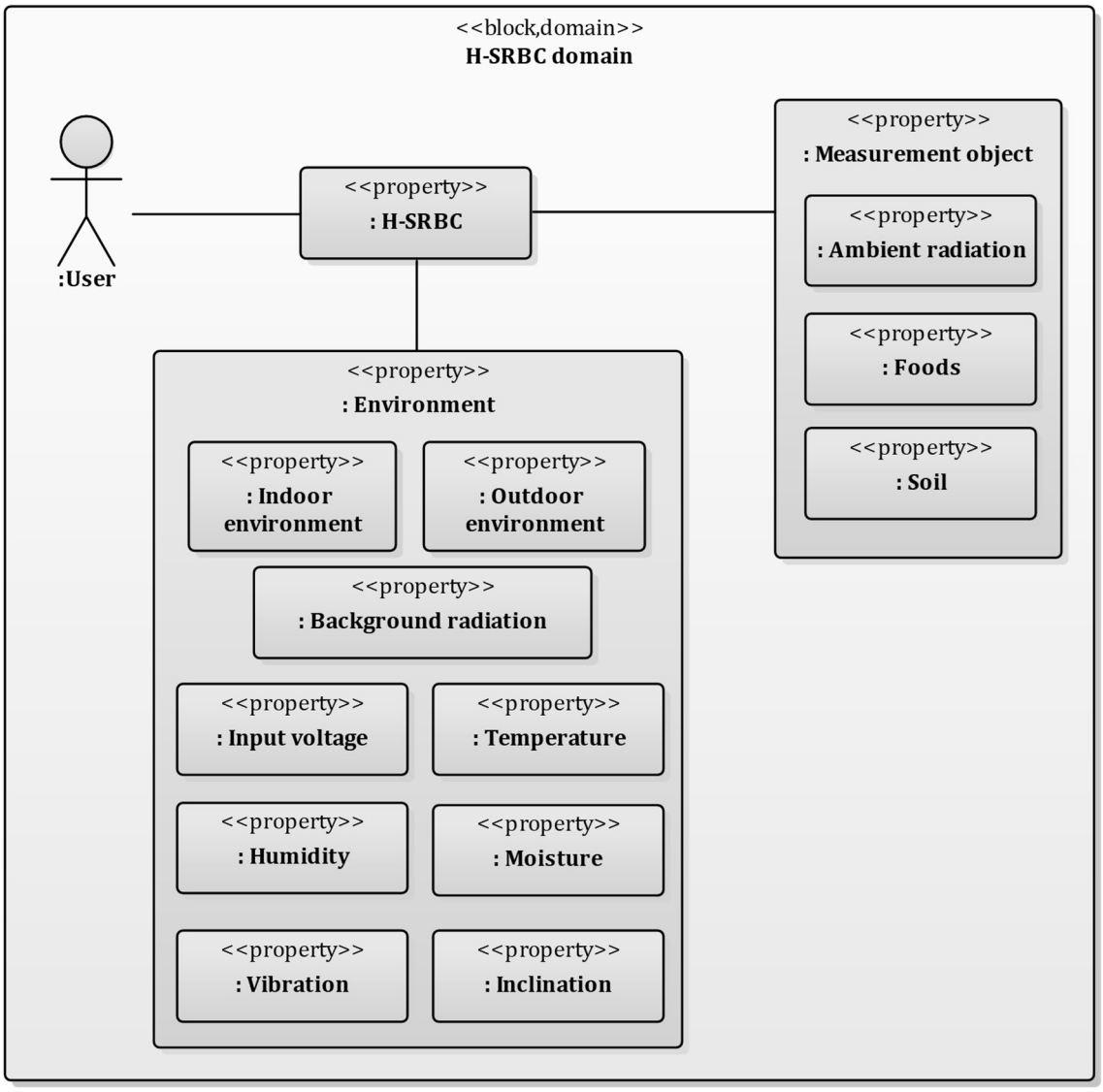


Fig. 4.2　Description result of design range.

次に、要求仕様に基づき、要求を整理、詳細な要求へと分解、分析を行い、H-SRBC に求められる要求を明確にする。

H-SRBC に求められることは、住民からの要求である、手軽に身近な放射線に対する安心、安全を確認できる高コストパフォーマンスな放射線計測システムであることが挙げられる。この要求には、正確に放射線を計測でき安全を確認できること、手軽に身近な環境や物を計測できることという要求が包含されている。Fig. 4.3 に、要求図を用いて記述した結果を示す。この 2 つの項目に関して、要求を具体化する。

まず正確な状況把握の要求に関して述べる。Fig. 4.4 に示すように、Fig. 4.3 で挙げた正確な状況把握という要求を満たすためには、正確に放射線を計測できること、放射線の人体への影響が安全な範囲かの確認ができること、過去からの放射線量、放射能濃度を時系

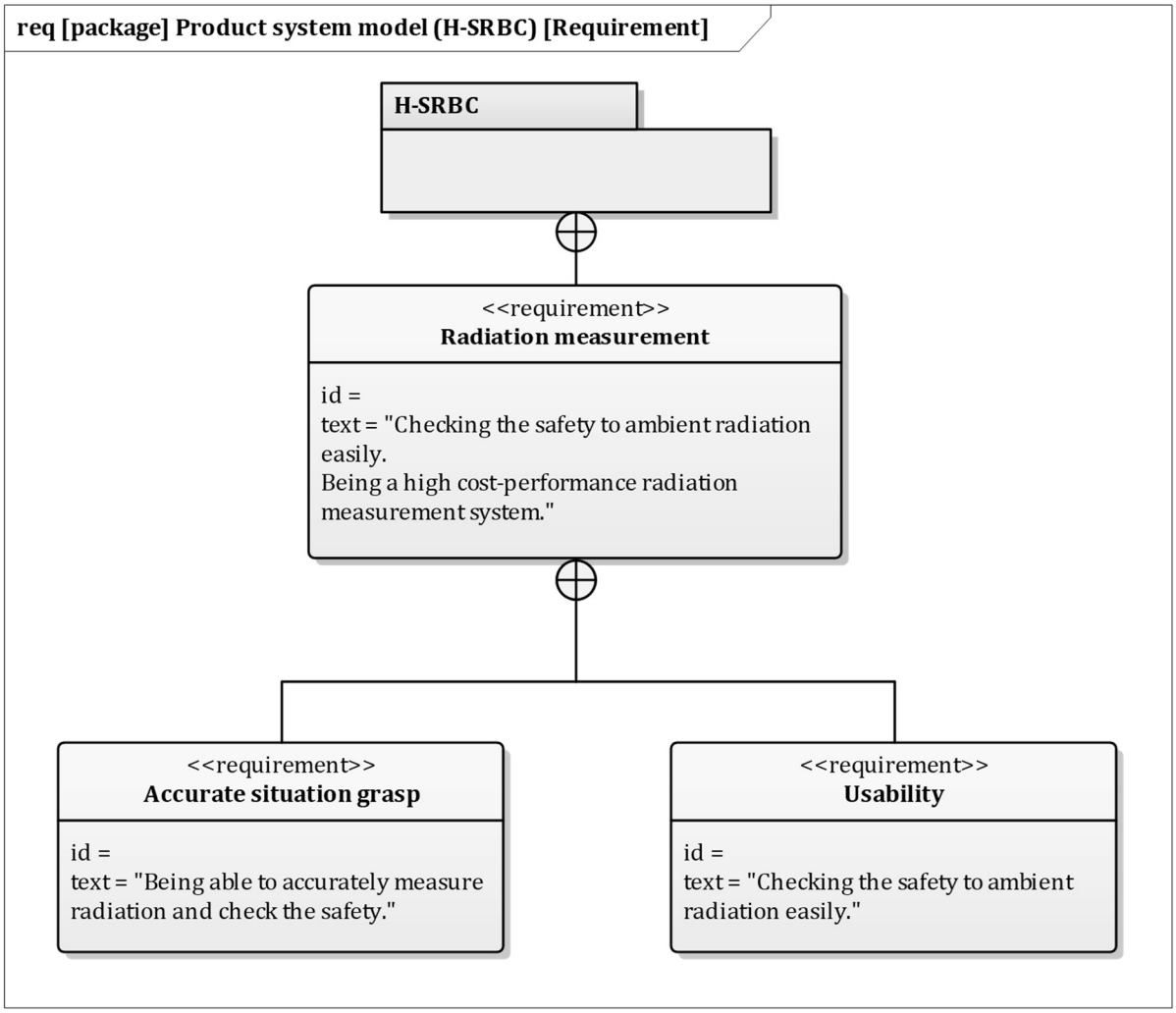


Fig. 4.3　Top requirement of H-SRBC.

列で比較できることという要求が導出される。さらに、時系列比較をするためには、測定データを保存し、利用できることが求められる。

Fig. 4.5 に示すように、Fig. 4.4 で挙げた正確な計測という要求を満たすためには、計測の S/N 比を向上させる必要があり、シグナルに関しては多くの放射線を検知できることと、ノイズに関しては、ノイズ信号をできるだけ低減することという要求が導出される。検知する放射線カウント数を増加させるためには、測定対象試料を大容量化し放射線源を多くすること、計測を長時間行うことで検知数を増やすこと、計測線量率を高める高感度化という要求が導出される。ノイズを低減するためには、システム内におけるノイズを低減すること、外部環境から受ける影響を低減することという要求が導出される。

Fig. 4.6 に示すように、Fig. 4.5 で挙げた外部環境の影響を低減するためには、外部環境であるバックグラウンド放射線、入力電圧、温度、振動を考慮する必要があり、バックグラウンドの放射線量を低減すること、入力電圧の変動、温度変化、振動に対して計測結果が変動しないようにすることが必要である。

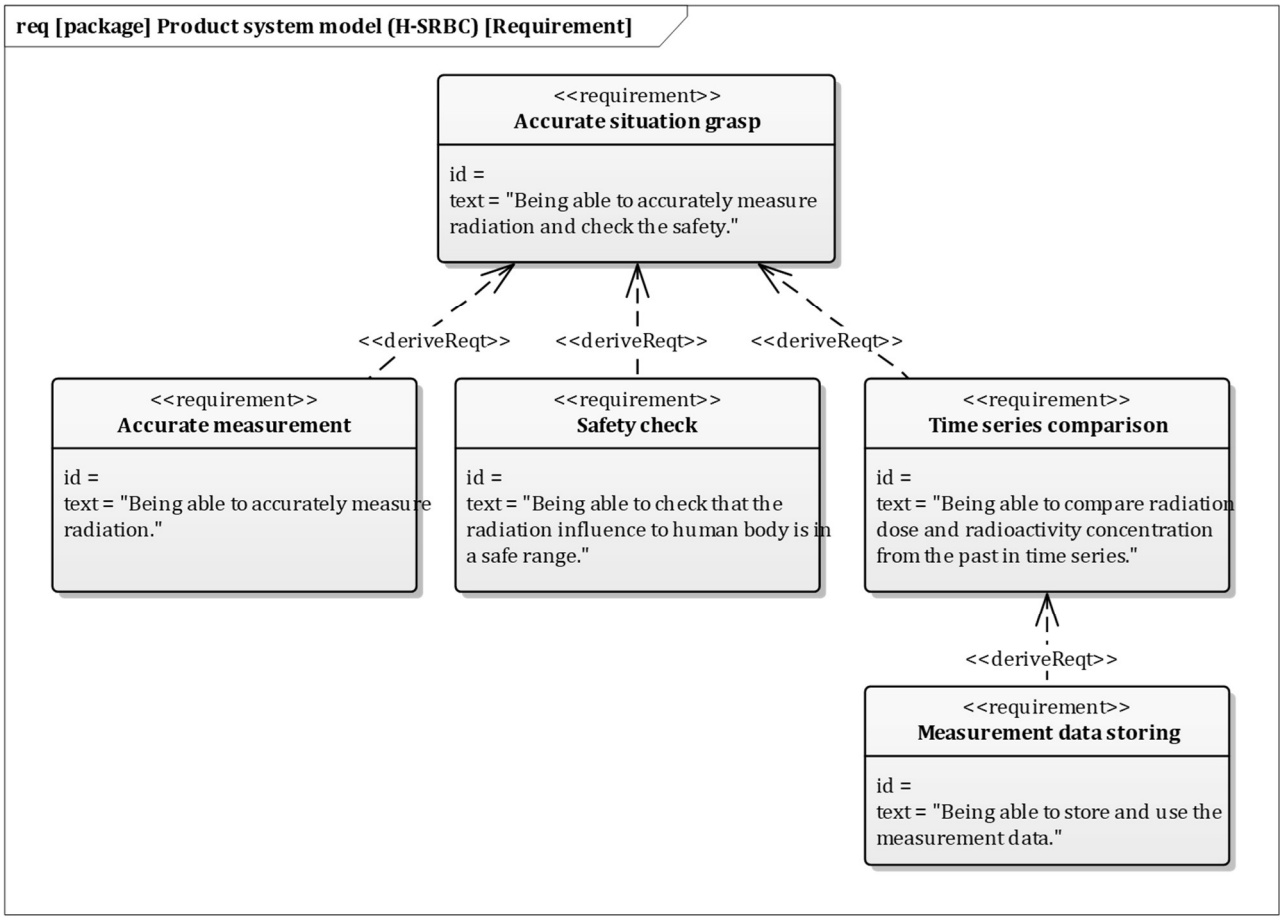


Fig. 4.4　Requirement of accurate situation grasp.

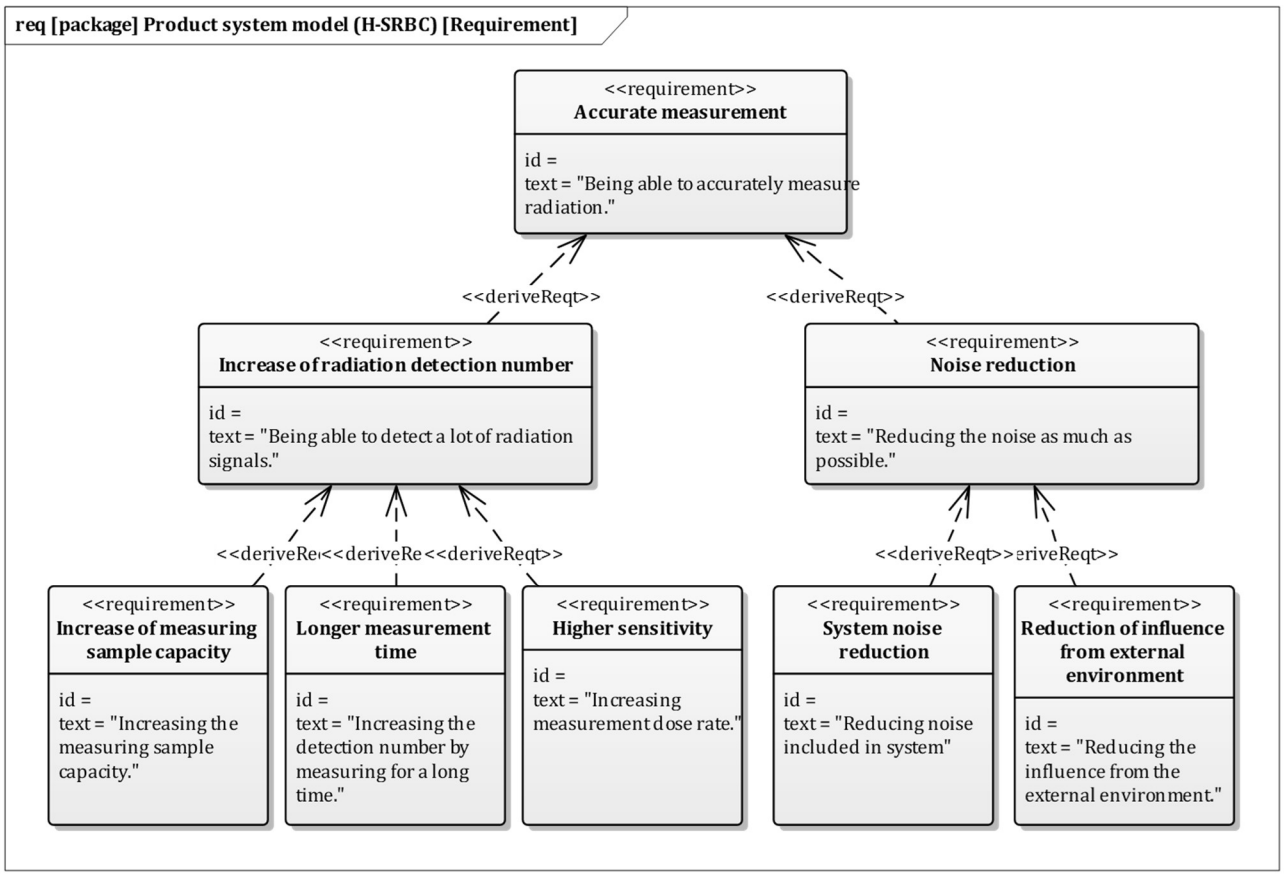


Fig. 4.5 Requirement of accurate measurement.

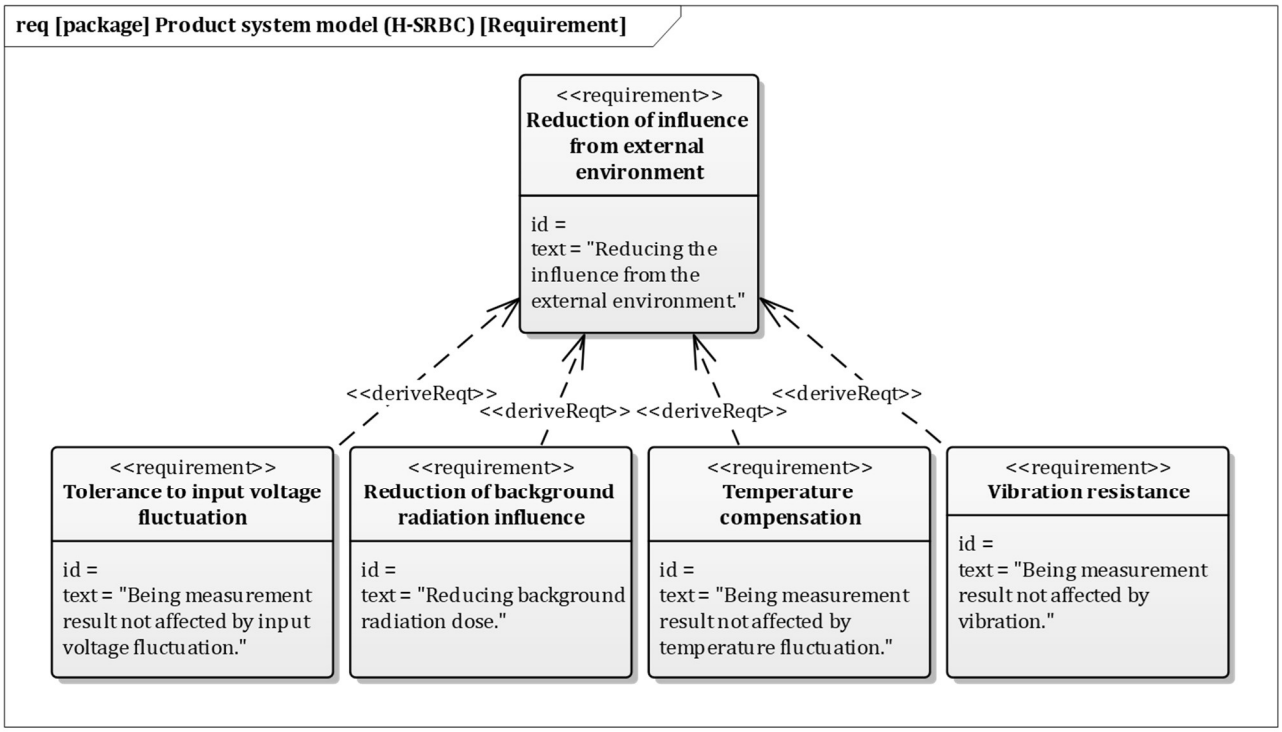


Fig. 4.6 Requirement of influence reduction from external environment.

Fig. 4.7 に示すように、Fig. 4.4 で挙げた安全の確認という要求を満たすためには、放射線の人体への影響度を判別できること、国が定めた食品の安全基準である 100Bq/kg を計測できるようにするために、検出限界が 50Bq/kg 以下であることが求められる。人体への影響度確認という要求を満たすためには、人体内部から受ける放射線量(食品等に含まれる放射能濃度)を計測できること、外部から受ける放射線量(空間放射線量)を計測できること、人体に影響を与える放射性物質の核種を判別できることが必要である。特に、原発事故由来の放射性物質である ^{137}Cs など半減期の長い放射性物質を判別できる必要がある。

Fig. 4.8 に示すように、Fig. 4.7 で挙げた内部被ばく、外部被ばくの計測を行うためには、γ 線の線量率を計測できることが必要である。また、内部被ばくに関しては放射能濃度を計測する必要があり、試料の重量を計測することも必要である。Fig. 4.7 で挙げた放射性物

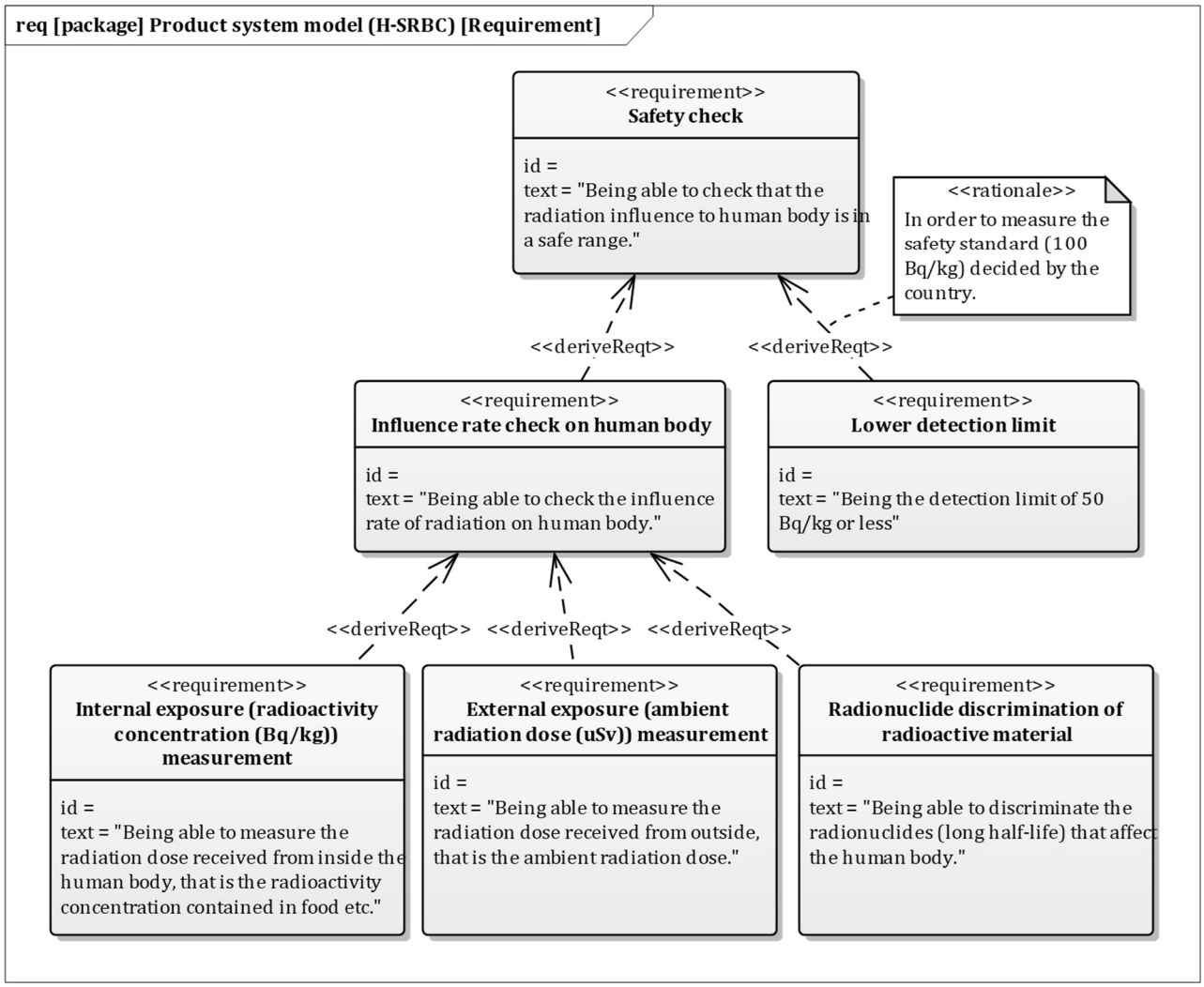


Fig. 4.7　Requirement of safety check.

質の核種判別を行うためには、放射線のエネルギースペクトルを取得できることと、核種によって既知のエネルギーを持つ放射線を放出することから、ピークエネルギー値を判別し、核種を特定できることが必要である。ピークエネルギーの判別を行うためには、^{134}Cs の 600keV ピークと ^{137}Cs の 662keV ピークを分離し、原発事故由来の ^{134}Cs と ^{137}Cs が判別できるように 10%以下の高分解能が求められる。また、10%以下の分解能であってもピークは重なるため、エネルギースペクトルを分離し、ピークエネルギーが判別できることも求められる。

次に、Fig. 4.3 で挙げたユーザビリティの要求に関して述べる。Fig. 4.9 に示すように、ユーザビリティの要求に対しては、手軽に簡単に計測できること、個人や小規模な団体で購入可能な低価格であること、屋内や屋外の使用環境に対応し使用できることが求められる。

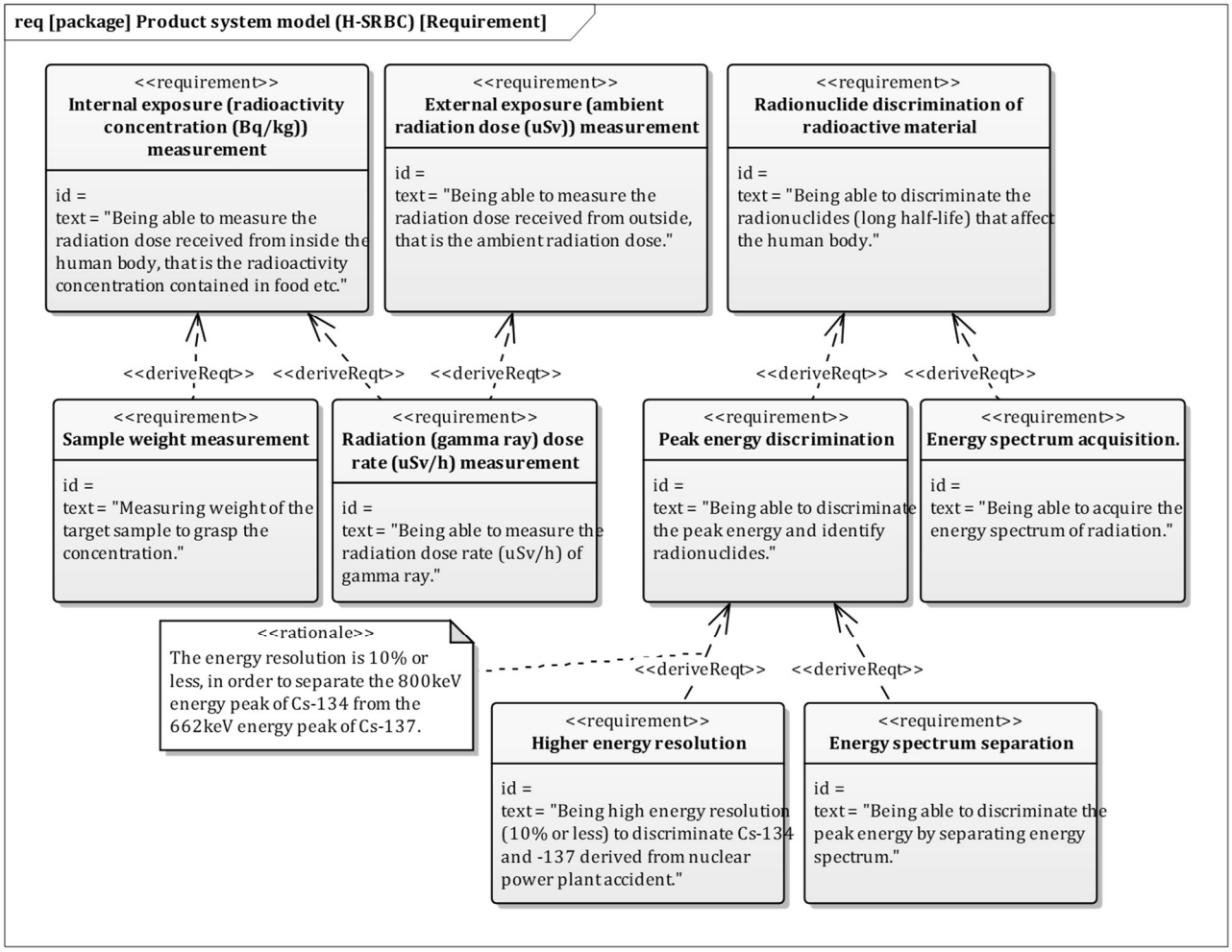


Fig. 4.8　Requirement of internal/external exposure measurement and radionuclide discrimination.

Fig. 4.10 に示すように、Fig. 4.9 で挙げた手軽で簡易な計測という要求に対しては、扱いやすい大きさである 5000cm^3 以下の小型であること、手軽に 1 時間以内という短時間で計測できること、手軽に扱える 10kg 以下の軽量であること、わかりやすく使いやすいユーザーインターフェースであることが求められる。これらの具体的な制約条件は、現地ヒアリングの結果に基づく要求仕様の数値である。

Fig. 4.11 に示すように、Fig. 4.9 で挙げた低価格の要求を満たすためには、購入価格が 30 万円以下と低価格であることと、メンテナンス費用が安いことが求められる。購入価格の制約条件は、現在の放射能計測器の 1/3 程度の価格で、現状技術とヒアリングの結果を考慮した要求仕様の数値である。購入価格を安くするためには、部材費、開発費、製造費を安くすることが求められる。低メンテナンス費用の要求を満たすためには、部品の交換や再調整までの期間が長くて済む計測器の性能寿命が長いこと、消耗品が簡単に安価で交換できること、汚れにくく簡単に掃除ができることが求められる。

Fig. 4.12 に示すように、Fig. 4.9 で挙げた使用環境対応の要求を満たすためには、傾きの変化に対し機器が壊れず計測結果が変動しないこと、生活防水程度の防水性があること、使用中に生じる程度の衝撃に対して耐衝撃性があること、山林などの現地で計測するために屋外での計測に対応できることが求められる。

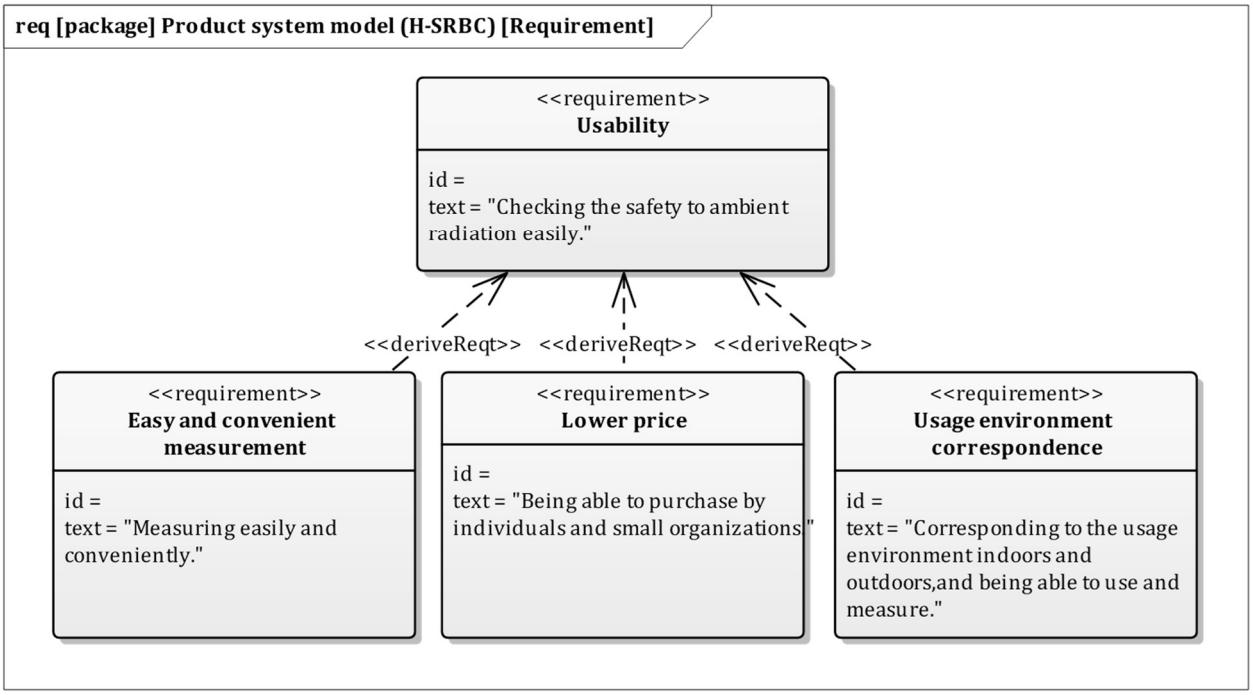


Fig. 4.9　Requirement of usability.

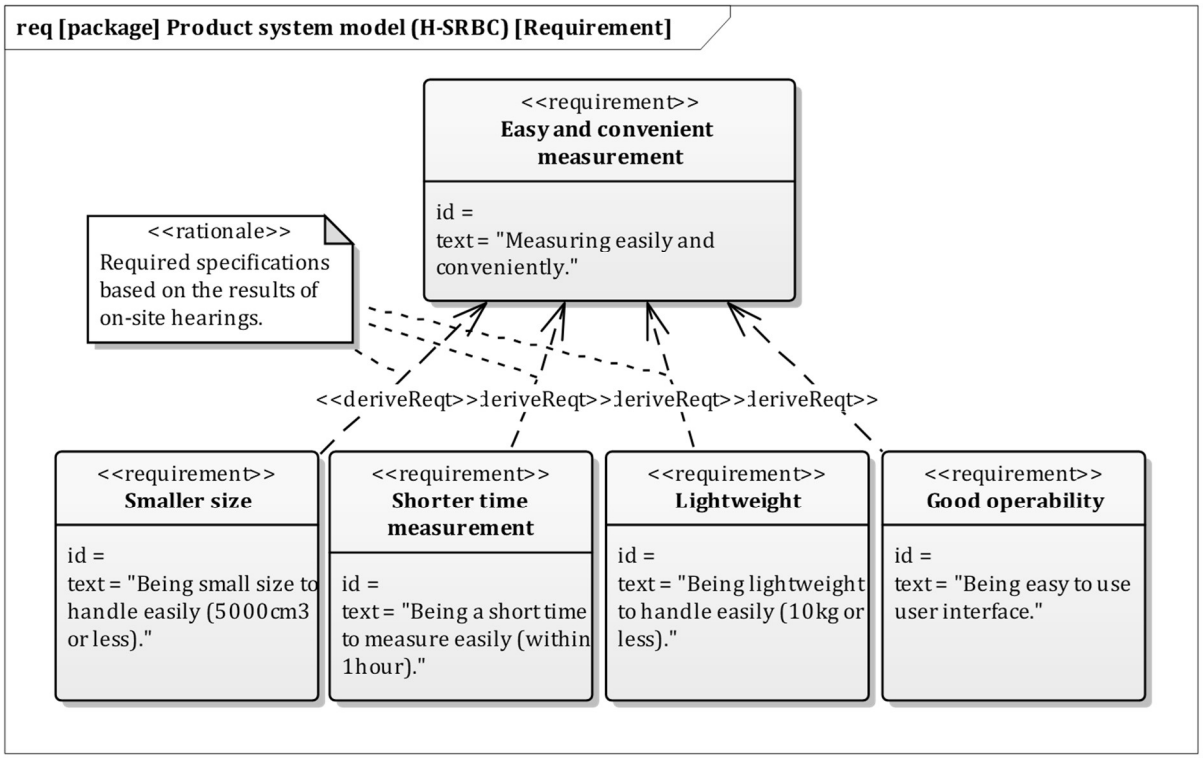


Fig. 4.10 Requirement of easy and convenient measurement.

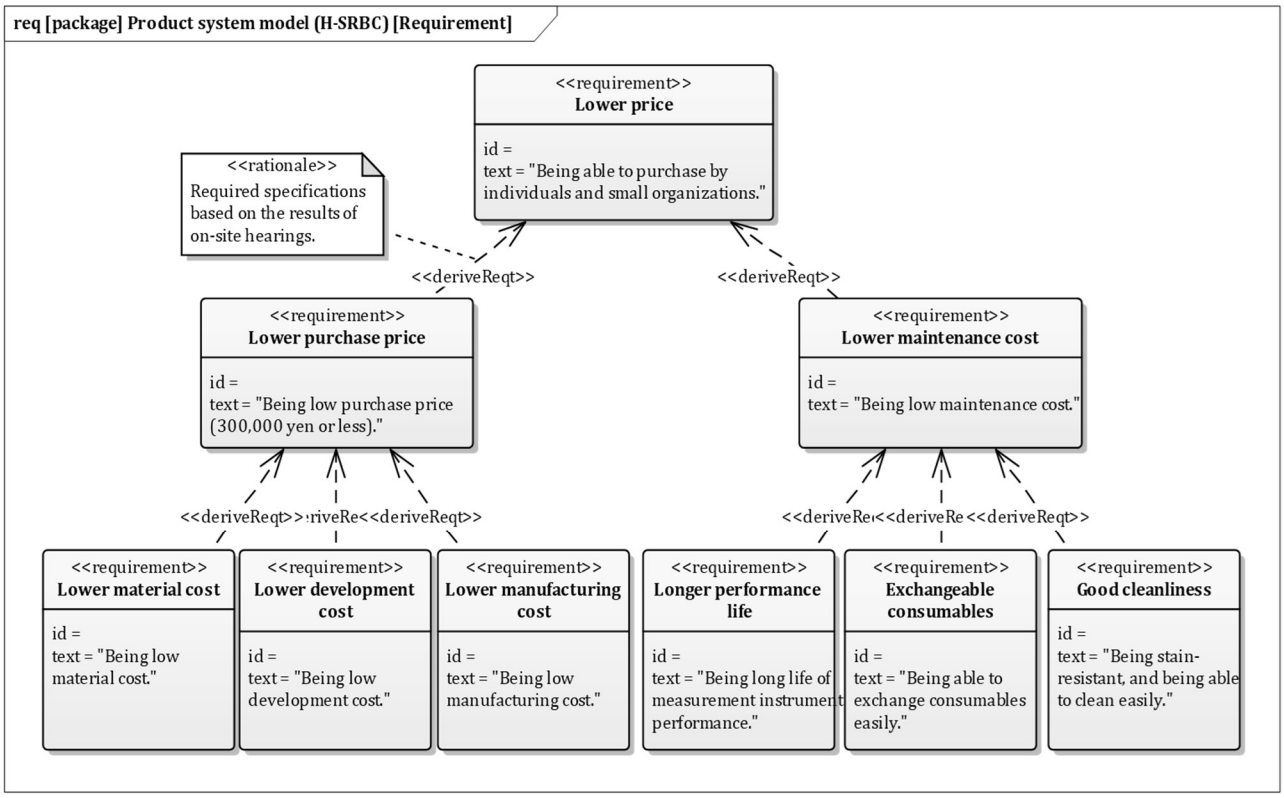


Fig. 4.11 Requirement of lower price.

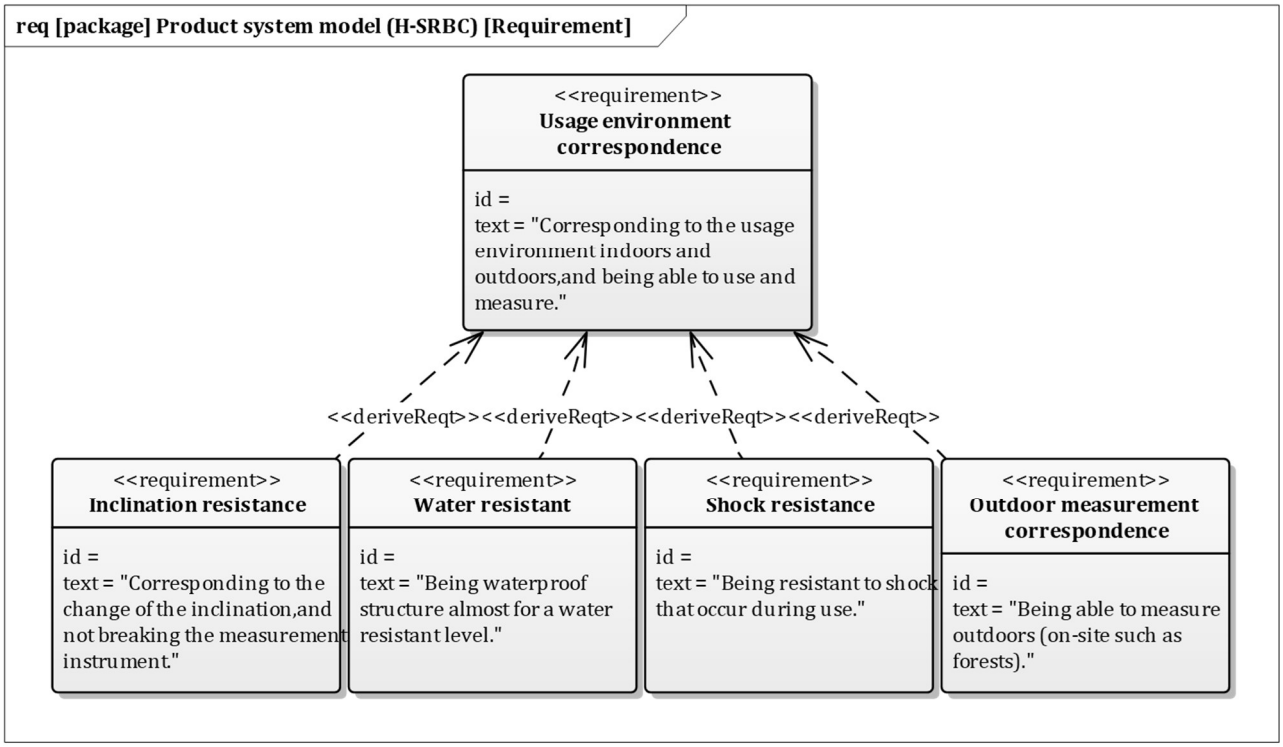


Fig. 4.12　Requirement of usage environment correspondence.

以上のように、製品システムである H-SRBC に係る要求を定義し、モデルを記述することができた。次に、要求を満たすような機能、振る舞いを定義する。

4.3.2.2　放射線計測システムに関する機能、振る舞いの定義とモデル記述

ここでは、要求を満たすような、製品システムに関する機能、振る舞いを定義し、モデルを記述する。H-SRBC に関しては、振る舞いに関係する機械的な機構などはなく、放射線を検出するハードウェアのセンシング機能とソフトウェアの計算、処理機能が予想される。そこで、ユースケース図を用いて、大まかな機能を記述することとする。記述した結果を Fig. 4.13 に示し、以下に詳細を述べる。

H-SRBC がユーザに提供する機能は、放射線に対する安全を確認する機能である。その機能が包含する機能としては、外部被ばくの影響を確認する機能と内部被ばくの影響を確認する機能がある。

外部被ばくの影響を確認する機能は、システム外部である空間放射線量と土壌と関係する機能である。空間放射線量に関係した外部被ばくの影響を確認する機能には、空間放射線量を計測する機能が含まれる。また土壌に関係した外部被ばくの影響を確認する機能に

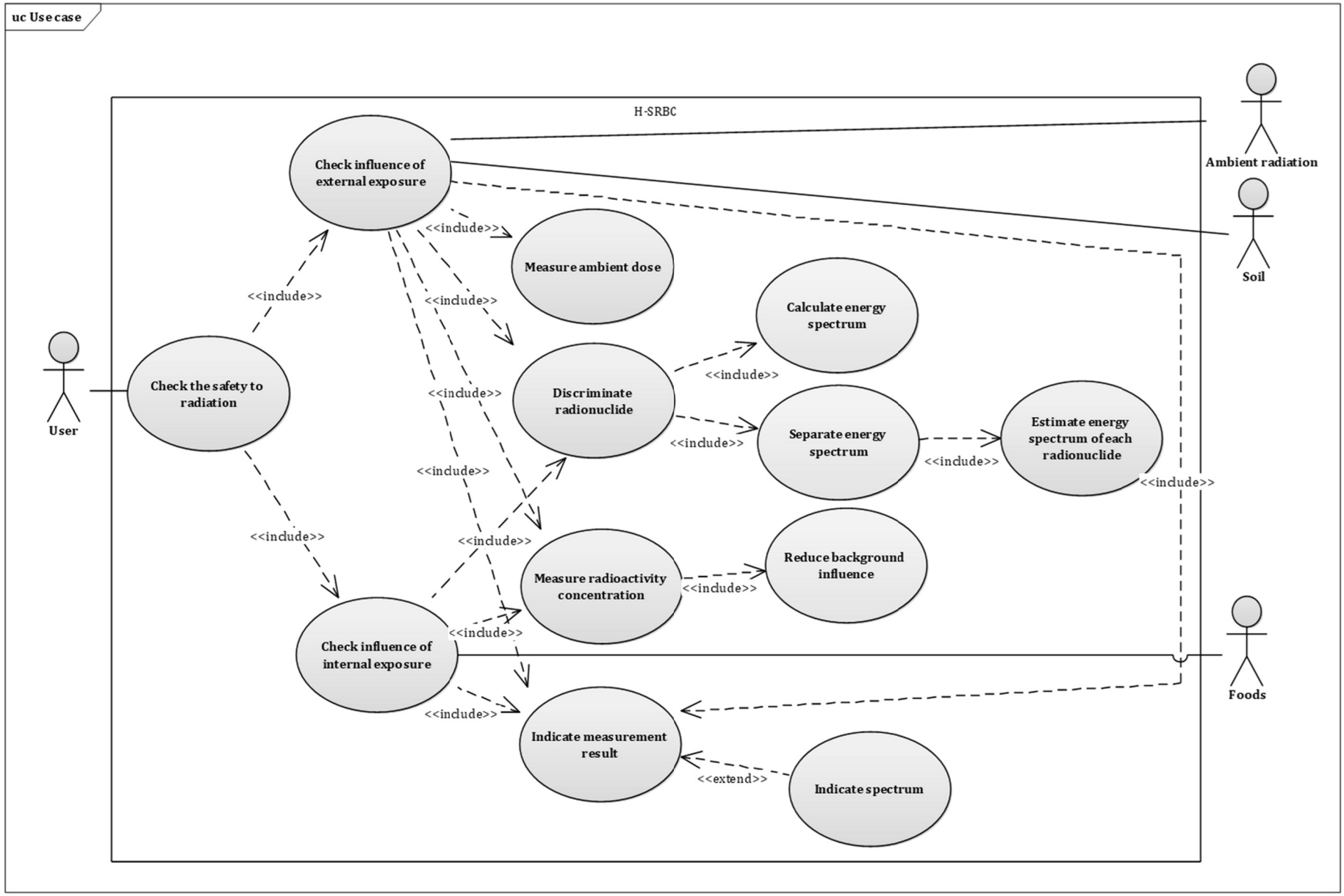


Fig. 4.13 Description result of use case.

は、空間放射線量を計測する他に、対象物の放射能濃度を計測する機能と、放射性核種を判別する機能が含まれる。内部被ばくの影響を確認する機能は、システム外部の食品と関係がある機能である。この機能には、対象物の放射能濃度を計測する機能と、放射性核種を判別する機能が含まれる。また、外部被ばく、内部被ばくの影響を確認する機能には、それぞれの計測結果を示す機能も含まれる。計測結果を示す機能には、拡張機能として、スペクトルを示す機能がある。

対象物の放射能濃度を計測する機能には、バックグラウンドの影響を除去する機能が含まれる。放射性核種を判別する機能には、計測結果をヒストグラム化しエネルギースペクトルを算出する機能と、放射性核種ごとにエネルギースペクトルを分離する機能が含まれる。エネルギースペクトルを分離する機能には、ノイズ分やスペクトルの重なりなどを考慮するために、放射性核種別のエネルギースペクトルを推定する機能が含まれる。

以上のように、製品システムに関する大まかな機能を定義し、モデルを記述することができた。次に、要求を満たし、機能、振る舞いを実現できる理想システム構成を定義する。

4.3.2.3　放射線計測システムの理想システム構成の定義とモデル記述

ここでは、要求を満たし、機能、振る舞い実現する理想システム構成を定義し、モデルを記述する。そのために、まずは要求、機能を基に、理想システム構成の推定を行う。

放射線計測システムに関わる物理的な計測方式は確立された技術となっており、計測対象や使用目的の違いによって様々な計測器がある。放射線は直接計測することができないため、放射線と物質の間で起こる相互作用を利用して計測する。放射線の計測は、放射線の存在有無だけでなく、放射線の線量やエネルギー、あるいはその他の放射線のもつ性質を調査することに使用される。計測器を検出に関する物理現象的に大別すると、Table 4.3 に示すように 3 種類に分類される [3)]。電離作用による電子を利用するものとしては、電離箱、比例計数管、GM(ガイガーミュラー)計数管、半導体検出器、霧箱、泡箱、放電箱などがある。原子・分子の励起により発生する光を利用するものとしては、シンチレーションカウンタ、Cherenkov カウンタがある。化学反応を利用するものとしては、原子核乾板、化学線量計などがある。前述の通り、これらの計測方式から計測対象や使用目的に応じて選定する必要がある。

H-SRBC の計測対象となる放射線は γ 線である。γ 線は、非常に透過性が高く外部被ばくの主な原因である。体外にある放射性物質から発せられた放射線が身体を通過する際に被

Table 4.3　Classification of radiation measurement instruments.

Physical phenomena	Measuring instruments
Electrons by ionization effect	Ion chamber
	Proportional counter
	GM counter
	Semiconducting detector
	Cloud chamber
	Bubble chamber
	Spark chamber
Fluorescence by excited atoms or molecules	Scintillation counter
	Cherenkov counter
Chemical reaction	Nuclear plate
	Chemical dosimeter

ばく、つまり外部被ばくするため、γ 線の量を計測することで外部被ばくによる人体への影響を確認することができる[4)]。α 線、β 線は、電離作用が強いため透過性が低く飛距離は短いが、放射性物質を体内に取り込んだ場合に、内部被ばくに関与する。しかし、α 線、β 線、γ 線を全て同時に計測することはその性質上難しい。そこで、内部被ばくに関しても、γ 線を計測することで、放射線源の強度を評価し、内部被ばくによる人体への影響を確認することとする。γ 線の計測方式としては、主にシンチレーションカウンタ、半導体検出器、GM 計数管が利用されているため、それらの比較を行う。

シンチレーションカウンタは、γ線が入射することによって蛍光を発する物質(シンチレータ)を用いて、その光を受光し電気信号に変換することで放射線を計測するものである。シンチレータでは、γ 線が入射することで、光電効果、コンプトン効果、電子対創生という相互作用を起こし、γ 線エネルギーの吸収が行われる[5, 6)]。シンチレータの発光原理[7)]は、Fig. 4.14 に示すように、①γ 線が入射し物質中で相互作用を起こす。②価電子帯にある電子は十分なエネルギーを得て伝導帯に移動する。③この電子は伝導帯内を自由に動き周る。捕獲中心に捕らえられ、熱励起により再び伝導帯へ戻ることもある。④価電子帯に残った正孔は価電子帯を移動する。⑤正孔は活性化物質の基底準位の束縛電子を奪い結合し、基底準位に空位が生じる。⑥伝導帯にある自由電子は活性化物質の励起準位に下がる。⑦さらにその電子は空位の基底準位に遷移する。⑧この遷移によって、活性化物質の励起準位

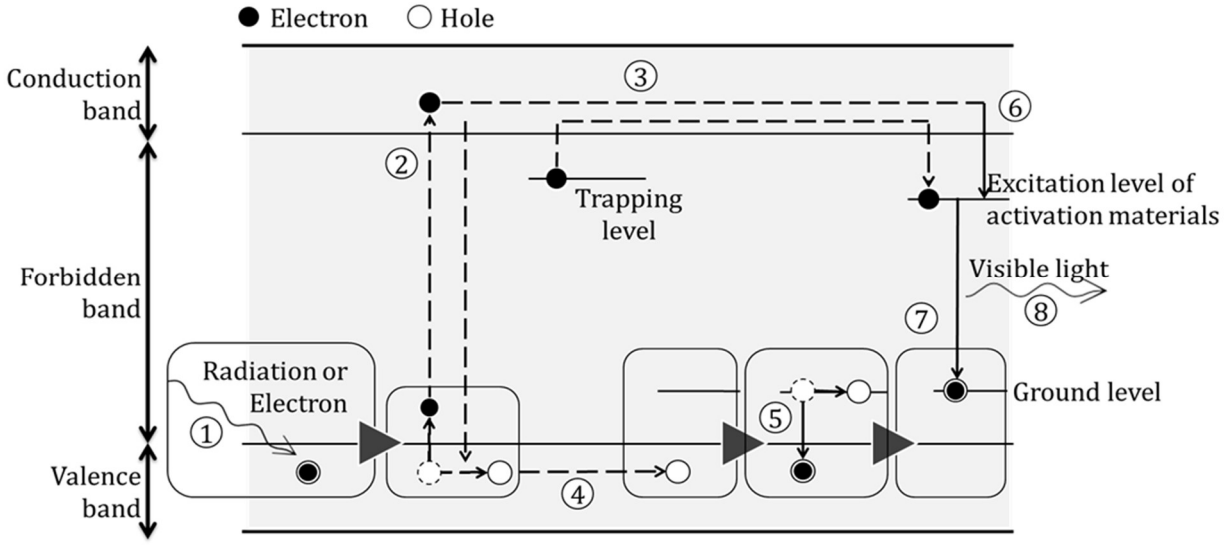


Fig. 4.14　Principle of light emission.

と基底準位のエネルギー差がシンチレーション光として放出される。以上が発光原理である。シンチレータは種類によって活性化物質の励起準位が決まっているため、γ 線の入射エネルギーに比例して、シンチレーション光の光子数が変化する。シンチーションカウンタでは、シンチレーション光の発光毎の光子数はエネルギー計測に、発光回数は線量計測に利用することができる。

半導体検出器は、γ 線を半導体で直接検出する方式である[8, 9]。検出原理は、Fig. 4.15 に示すように、半導体に γ 線が入射すると、その飛跡に沿って多数の電子正孔対が生成される。この生成過程には、γ 線が直接電子を励起する過程と、励起された電子が伝導帯の下方に下りてくる際に余分なエネルギーが電磁波として放出され、その電磁波によって繰り返し他の電子が励起される過程の両方が含まれる。生成される電子正孔対の個数は、入射γ線のエネルギーに相当する。生成される電子正孔対の平均個数をN、入射エネルギーをE、一対の電子正孔対の生成に必要な平均エネルギーをεとすると、

$$N = \frac{E}{\varepsilon} \tag{4.1}$$

が成り立つ。εはその半導体のバンドギャップに相当する。したがって、半導体検出器において、検出電荷量と検出回数は、それぞれエネルギー計測と線量計測に利用される。半導体検出器は、半導体の種類によって検出器の性質が変わり、代表的なものとして、Ge 半導体検出器と Si 半導体検出器がある。Ge 半導体検出器は、バンドギャップが小さく多くの

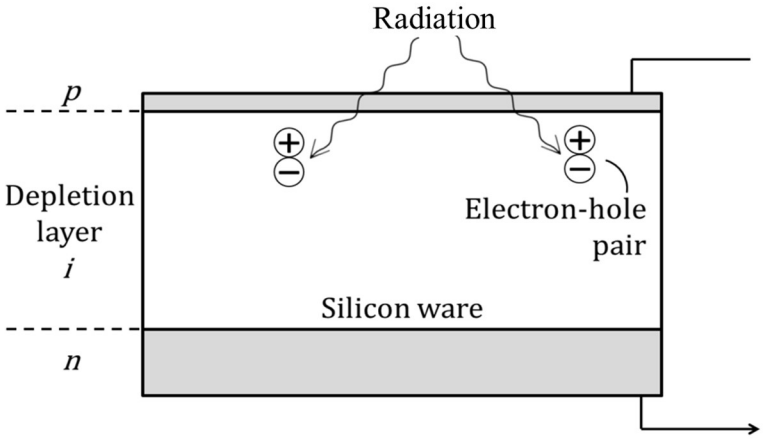


Fig. 4.15　Principle of semiconductor detector.

電荷を検出できるため、エネルギー分解能が非常に高く、放射能の計測や核種の分析など放射線の詳細な計測に向いている。しかし、バンドギャップが小さいことで熱による励起が大きく関与するため、液体窒素での冷却が不可欠である。高精度な計測が可能な反面、装置が大きく、重く、長時間の計測を有するなど、使用には専門性を必要とする。Si 半導体検出器は、PIN 型半導体でできており、小型で安価に利用できる。しかし、Si の原子番号が 14 で、密度が小さいため、γ 線阻止能が低く、入射 γ 線の多くがエネルギーをあまり消費せず透過してしまうため、核種判別などには不向きである。

GM 計数管は、もっとも古い形式の放射線検出器の 1 つであり、電離に基づくガス入り検出器で、ガス増幅によって放射線の飛跡に沿って作られた最初のイオン対を大きく増幅する、ガイガー放電の連鎖反応が利用されている [10-12)]。Fig. 4.16 に示すように、入射放射線によって生成された電子によって電子なだれが引き起こされた際、2 次イオンに加えて多数の励起ガス分子が電子衝突によって作られる。この励起分子は、数 ns 以下の時間に光子を放出して基底状態に戻る。光子のエネルギーによって、新しく生み出された自由電子が陽極に向かって移動する過程で、別の電子なだれを次々に引き起こし、自己伝播型連鎖反応を起こす。GM 計数管では非常に高い電界が印加されており、ガイガー放電が短時間に指数関数的に起こり、最終的には、入射放射線が生成した最初のイオン対の数に関係なく、ほぼ同じ全電荷量に成長し、ガイガー放電が終了する。したがって、GM 計数管では、非常に大きな電荷量を収集でき、安定した出力を得ることができる。また、外部での増幅が必要なく、周辺電子回路を簡単にでき、また管自体が安価であるため、装置全体として

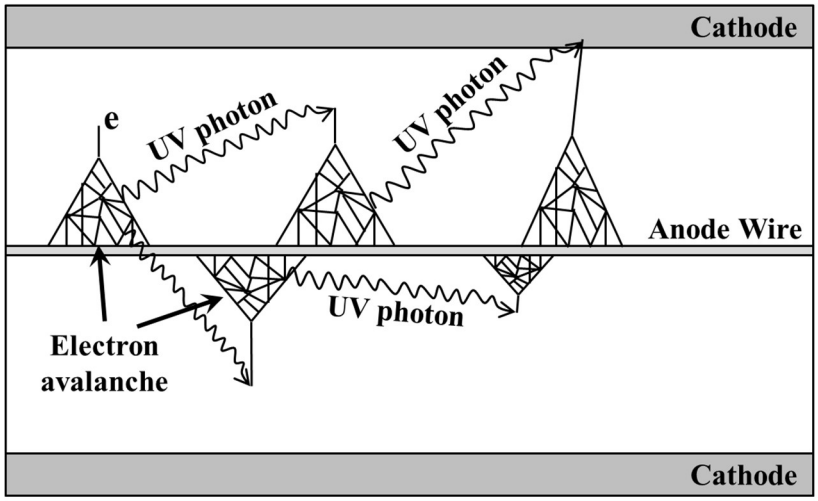


Fig. 4.16　Mechanism of Geiger discharge.

Table 4.4　Comparison of measurement method.

	Measuring Object		Distinction of nuclides
	Radiation	Radioactivity	
Scintillation counter	◎	◎	◎
Si semiconductor detector	◎	○	○
Ge semiconductor detector	-	◎	◎
GM tube counter	◎	-	-

低価格で利用できる。しかし、原理の性質上、放射線の入射エネルギーの情報は得られない。また、充填されたガスが計測に伴い機能を果たすと解離するため、徐々に消費されるという使用寿命があり、一定期間毎に管の交換など、メンテナンスを有する。

以上の代表的なγ線の計測方式について、H-SRBC への要求である空間放射線量の計測、放射能濃度の計測、核種判別に関して比較したものを Table 4.4 に示す。要求項目を満たす可能性のある計測方式としては、シンチレーションカウンタと Si 半導体検出器である。この 2 種類について、γ 線のエネルギー吸収効率について考慮する。γ 線の吸収(減衰)には、物性値である線減衰係数と入射方向の距離(厚さ)が関係する。ここで一例として、シンチレーションカウンタに利用されている CsI(ヨウ化セシウム)シンチレータ結晶と Si 半導体検出器に利用される Si について比較する。Table 4.5 に示すように、662keV、100keV のエ

Table 4.5　Relation between linear attenuation coefficientand Half-Value Layers(HVL) of CsI or Si.

	Llinear attenuation coefficient near 662keV(/mm)	HVL thickness(mm)	Linear attenuation coefficient near 100keV(/mm)	HVL thickness(mm)
Si	0.01799226	39	0.0427788	16
CsI	0.03511486	20	0.917785	1

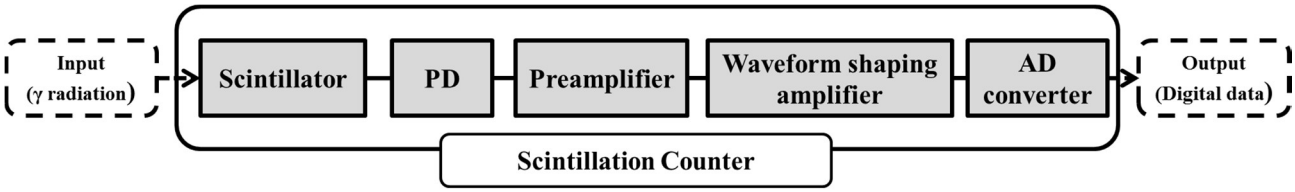


Fig. 4.17　Configuration example of scintillation counter.

ネルギーを持つ入射 γ 線を仮定した場合、エネルギーを半分にする半価層の厚さを比較すると、CsI シンチレータの方が Si よりも 2 倍以上の短い距離で γ 線を吸収できることがわかる。したがって、要求を満たし、かつ高検出効率にできる可能性のあるシンチレーションカウンタを、H-SRBC の計測方式として採用する。シンチレーションカウンタの構成の一例を Fig. 4.17 に示す。

次に、以上の検討を踏まえ、理想システム構成を定義し、モデルの記述を行う。ブロック図を用いて記述した結果を、Fig. 4.18、Fig. 4.19 に示す。Fig. 4.18 は機能構成を記述したもので、Fig. 4.19 はハードウェア的な側面でシステム構成を記述したものである。

Fig. 4.18 に示すように、H-SRBC を構成する機能要素としては、γ 線を検知し信号化する γ 線信号取得機能、γ 線信号の電圧変換からピーク電圧を検出する波高値取得機能、波高値をエネルギー値に変化し積算するスペクトルデータ作成機能、スペクトルデータや計測結果のデータ保存機能、放射能濃度を推定し算出する放射能計測機能、放射線量を推定し算出する放射線量計測機能、様々な項目、放射性核種の判別を行う核種判別機能、操作の入力や結果の出力などのユーザインタフェイス機能、移動計測などにおける位置推定機能、温度変化に対応するための温度補正機能、測定器と周辺機器との通信機能である。

Fig. 4.19 に示すように、H-SRBC を構成する要素としては、計測に関係する計測部、通信などの制御を行う制御部、様々な演算を行う計算部、ユーザに対する入出力を行う表示

部、電源に関係する電源部、位置情報の取得などを行う位置センサ、H-SRBC のケースである。計測部は、バックグラウンド遮蔽部、サンプル容器、検知部からなる。検知部は、センサ部、光検出デバイス、信号の増幅や取得を行う信号処理部、基板温度や筐体温度を計測する温度センサ、検知部ケースからなる。センサ部は、シンチレータ結晶、遮光材、反射材、ハウジングケースからなる。

次に、これらのシステム構成要素と要求との対応関係を述べる。記述した結果の一部を Fig. 4.20 に示す。ここで載せていない残りの記述結果については付録に示す。

Fig. 4.20 では、Fig. 4.5 で挙げた高感度化という要求に対して、シンチレーションカウンタへの要求へと詳細化し、固体シンチレータ結晶でその要求を満たすべきであることを示

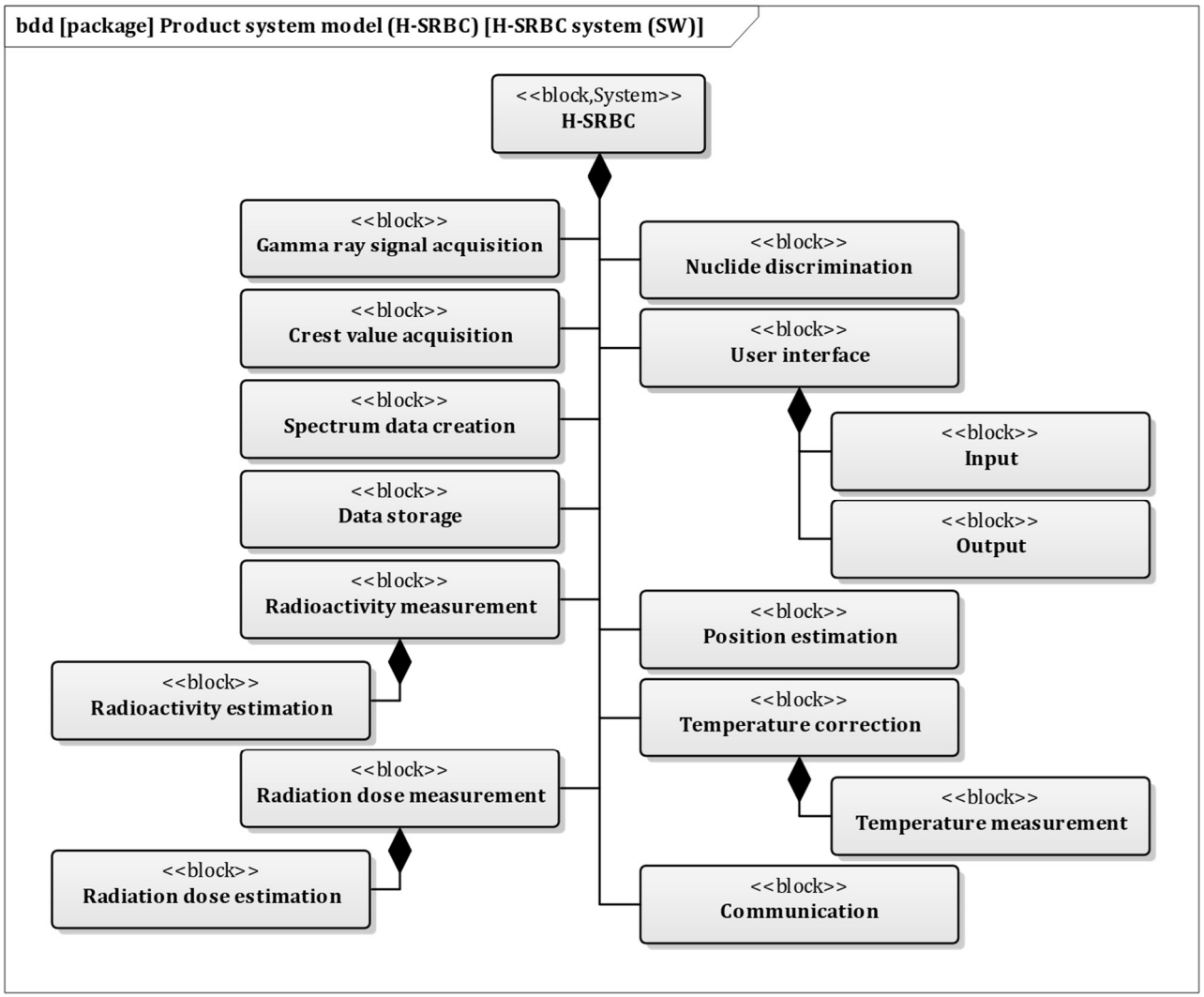


Fig. 4.18　Description result of ideal system functional structure.

している。高感度化という要求を満たすためには、放射線阻止能の高い物質を利用すること、放射線を捕獲する物質を大きくすることが求められる。高放射線阻止能の要求に対しては、線吸収率の大きいシンチレータを利用することが求められる。放射線阻止物質の大サイズ化の要求に対しては、シンチレータの体積を大きくすることが求められる。これら高い吸収率と大体積化という要求を、固体シンチレータにより満たす。つまり、固体シンチレータは高い吸収率を有し、大体積である必要がある。このように、どの要求に対してどのような構成要素で満たすのかという関係と、またその構成要素が満たすべき仕様を明確に記述することができる。

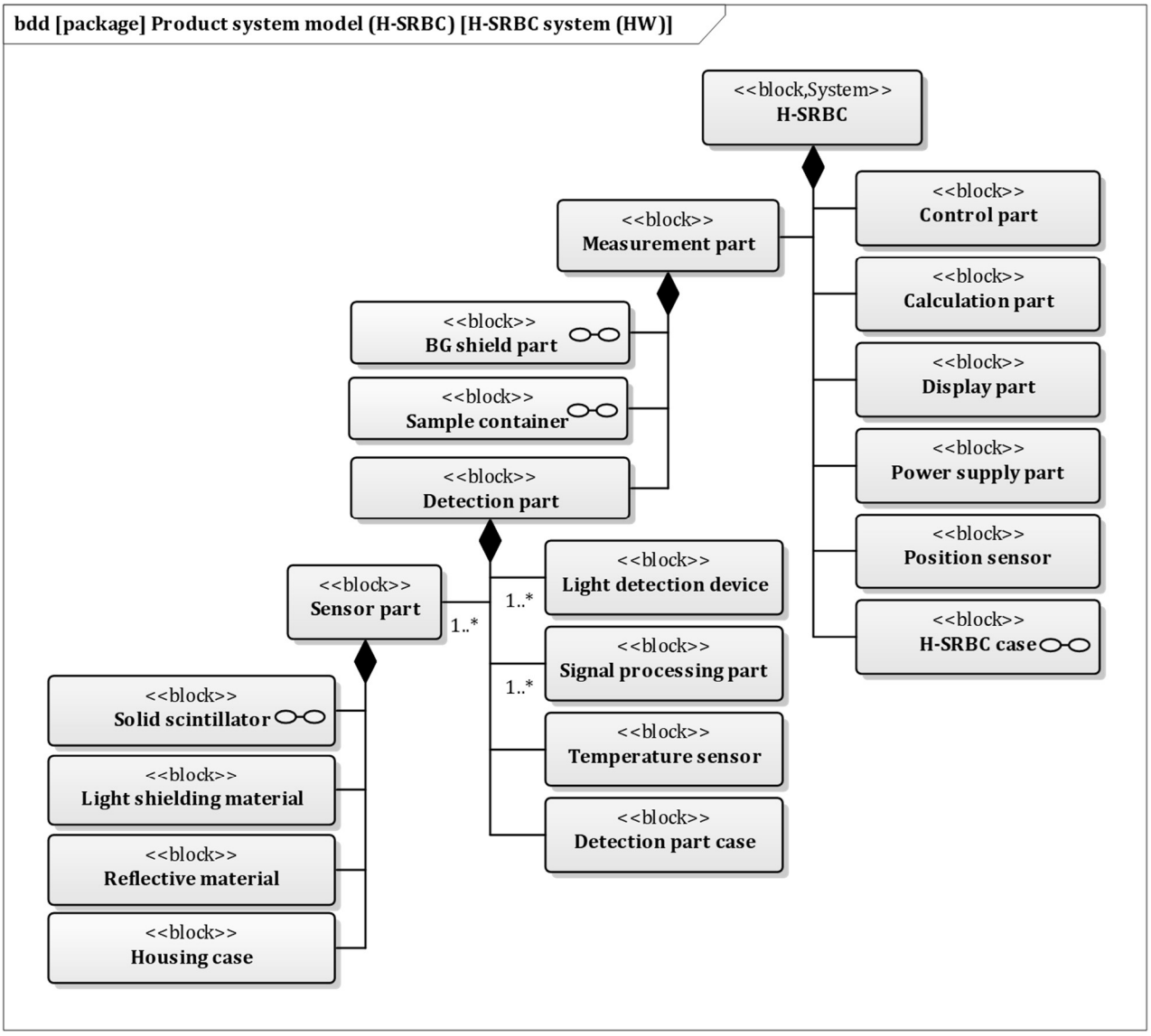


Fig. 4.19　Description result of ideal system structure.

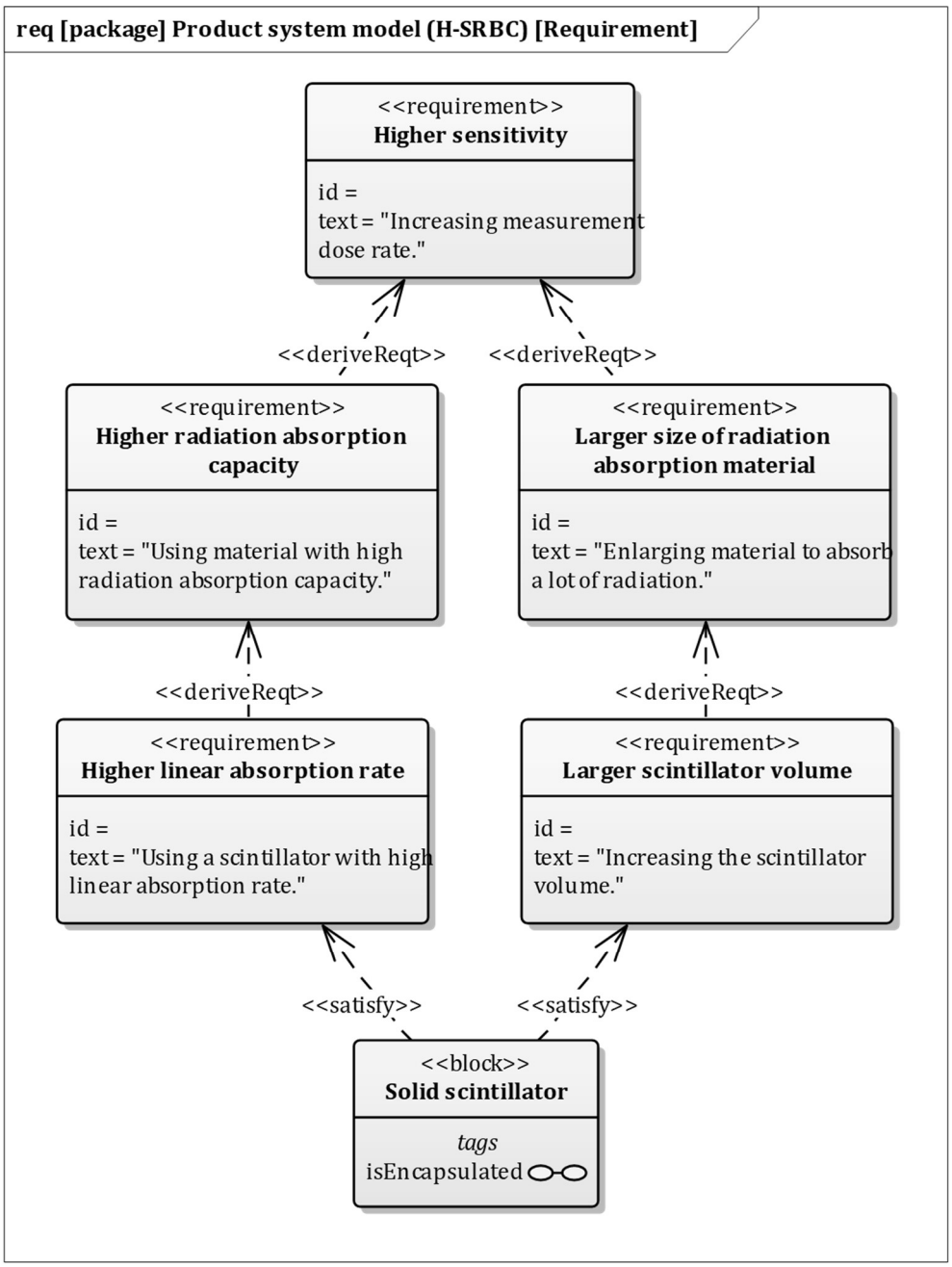


Fig. 4.20　Relationship between requirement and solid scintillator.

以上のように、要求を満たし、機能、振る舞い実現する理想システム構成を推定、定義し、モデルを記述することができた。また、要求とシステム構成との関係も明確に記述することができた。次に、理想システム構成に関する制約関係の定義を行う。

4.3.2.4　理想システム構成に関する制約関係の定義とモデル記述

ここでは、前述の通り定義した理想システム構成に関する制約関係を定義し、モデルを記述する。形状や物性といった情報はまだ含まれないため、主として一般的な物理式や経済式などの制約関係を記述する。

まず、H-SRBC の検出限界に関する制約式を定義する。これは、H-SRBC への要求として、低検出限界であることという要求があり、検出限界に関して定式化しておく必要がある。検出限界は、計測誤差(標準偏差)に関係している。また、誤差に対する信頼区間によっても検出限界値は左右される。信頼区間は、標準偏差σに対し2σの範囲で信頼度は 95%、3σの範囲で信頼度は 99.7%であることが知られている。この信頼度は、計測した値が計測誤差の範囲内に収まっていることを保障する確率である。検出限界DL(Bq/kg)は、

$$DL = \frac{a \times \sigma}{\left(\frac{S_{Bq}}{100}\right)} \tag{4.2}$$

で表される。aは信頼区間を決める係数、σは標準偏差(cpm)、S_{Bq}は放射能濃度計測に対する感度(cpm)である。標準偏差σは、

$$\sigma = \sqrt{\frac{S_{Bq} + CR_{BG}}{MT} + \frac{CR_{BG}}{MT}} \tag{4.3}$$

で求められる。CR_{BG}は計測部内部のバックグラウンドの計数率(cpm)、MTは計測時間(min)である。計測部内部のバックグラウンド計数率CR_{BG}は、

$$CR_{BG} = S \times Sv_{BG} \tag{4.4}$$

で求められる。Sは検出器の感度(cpm/(μSv/h))、Sv_{BG}は計測部内部のバックグラウンド放射線量(μSv/h)である。放射能濃度計測に関する感度S_{Bq}、検出器の感度S、計測部内部のバックグラウンド放射線量Sv_{BG}については、シンチレータやバックグラウンド遮蔽部の形状や物性値が決まらなければ求めることができないため、ここでは定式化することはできない。

以上の制約関係を記述した結果を、Fig. 4.21～Fig. 4.24 に示す。Fig. 4.21 はブロック定義図を用いてパラメータの型を記述した結果、Fig. 4.22 はブロック図を用いて制約式を記述した結果、Fig. 4.23 は内部ブロック図を用いて各パラメータがどの構成要素に属するかを記述した結果、Fig. 4.24 はパラメトリック図を用いて検出限界に関わる制約関係を可視的に記述した結果である。

次に、H-SRBC のコストに関する制約式を定義する。これは、H-SRBC への要求として、低価格化という要求があり、コストに関して定式化しておく必要がある。H-SRBC 全体で

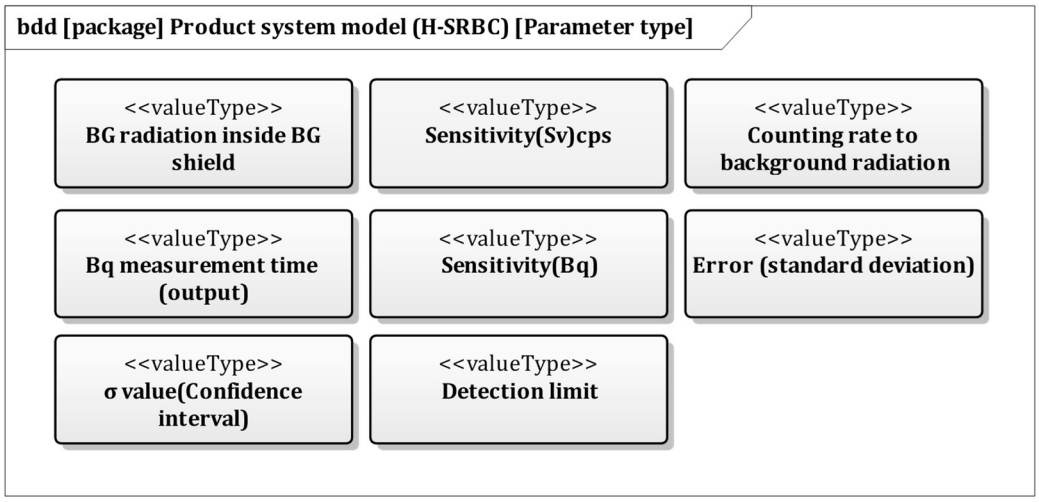


Fig. 4.21 Description result of parameter type.

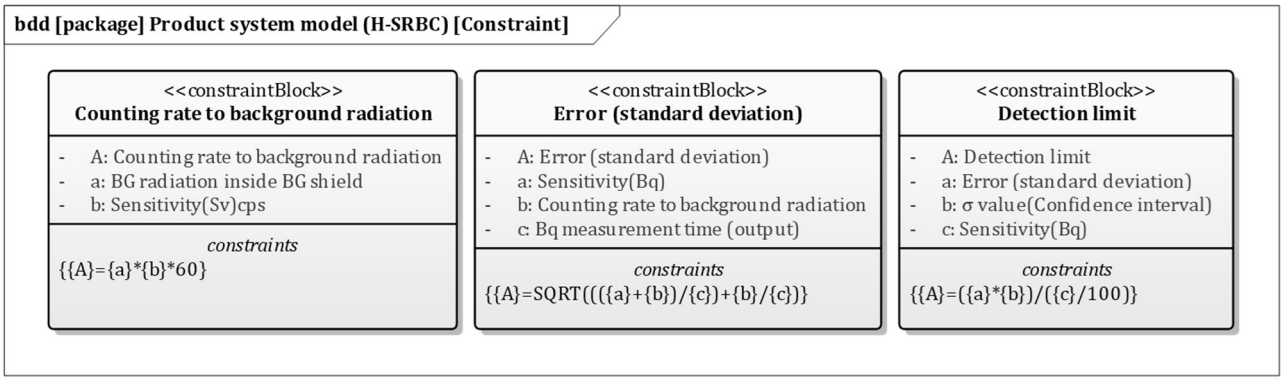


Fig. 4.22 Description result of constraint.

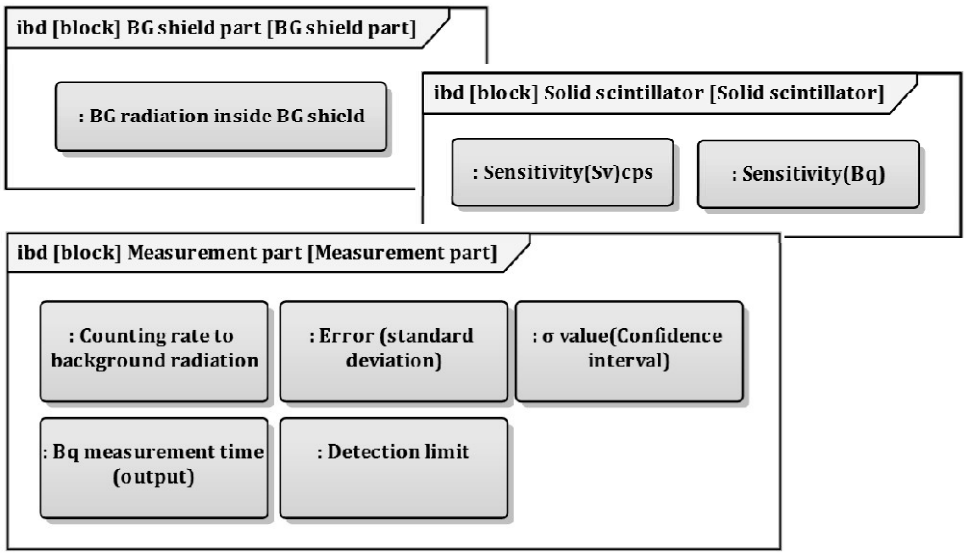


Fig. 4.23 Description result of assigning to system structure.

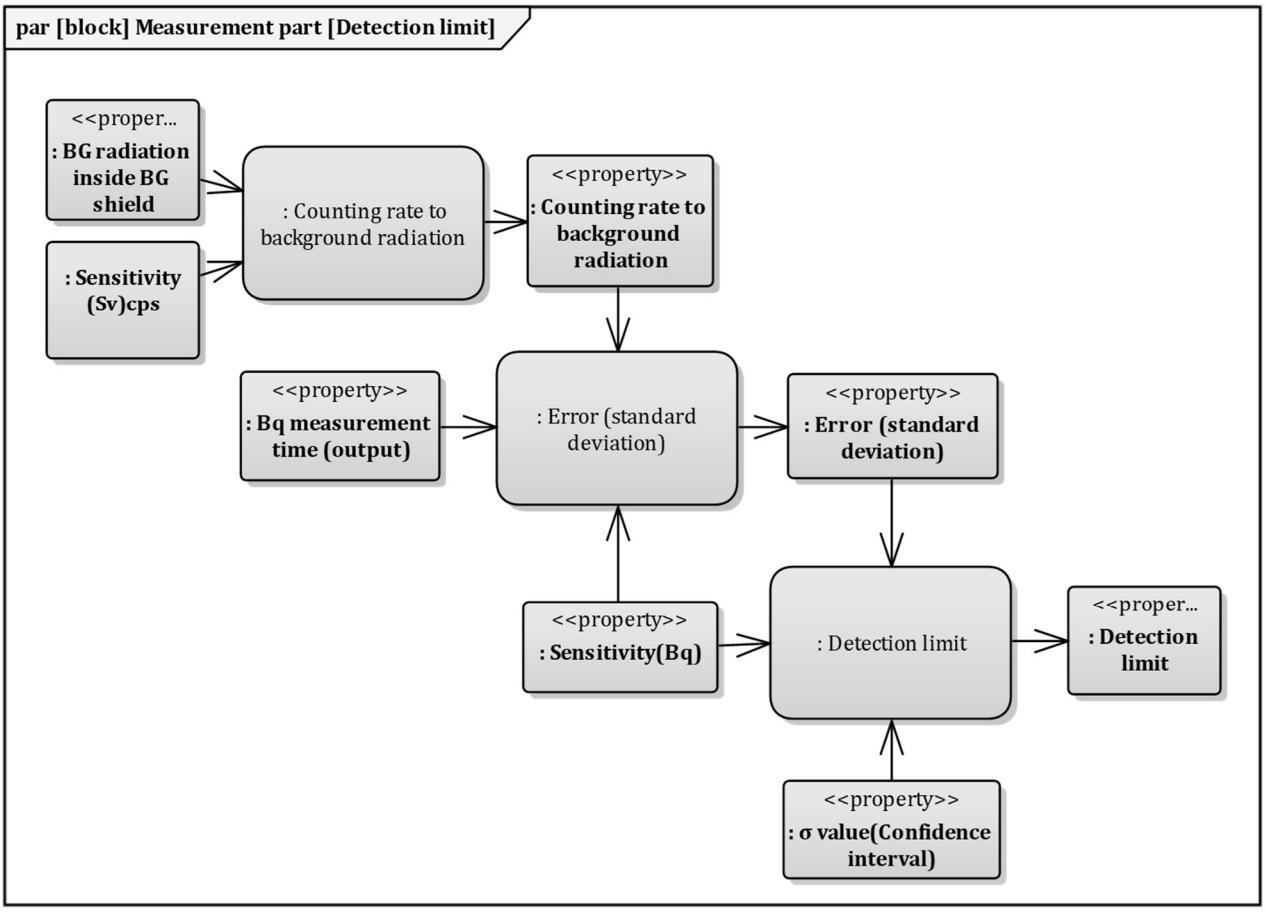


Fig. 4.24　Description result of constraint relationship.

のコストは、各システム構成要素のコストの総和、

$$C = \sum_{i=1}^{16} C_i \tag{4.5}$$

で求められる。Cは H-SRBC 全体でのコスト(円)、C_iは各構成要素のコスト、iは各構成要素を表している。H-SRBC の構成要素は、Fig. 4.19 の通り、シンチレータ結晶、遮光材、反射材、ハウジングケース、光検出デバイス、信号処理部、温度センサ、検出部ケース、バックグラウンド遮蔽部、サンプル容器、制御部、計算部、表示部、電源部、位置センサ、H-SRBC のケースである。

コスト式を記述した結果を、Fig. 4.25～Fig. 4.28 に示す。Fig. 4.25 はブロック定義図を用いてパラメータの型を記述した結果、Fig. 4.26 はブロック図を用いて制約式を記述した結果、Fig. 4.27 は内部ブロック図を用いて各パラメータがどの構成要素に属するかを記述した結果、Fig. 4.28 はパラメトリック図を用いてコストに関わる制約関係を可視的に記述し

た結果である。同様にして他の制約関係についても定義した。ここで載せていない残りの制約関係の定義、記述結果については付録に示す。

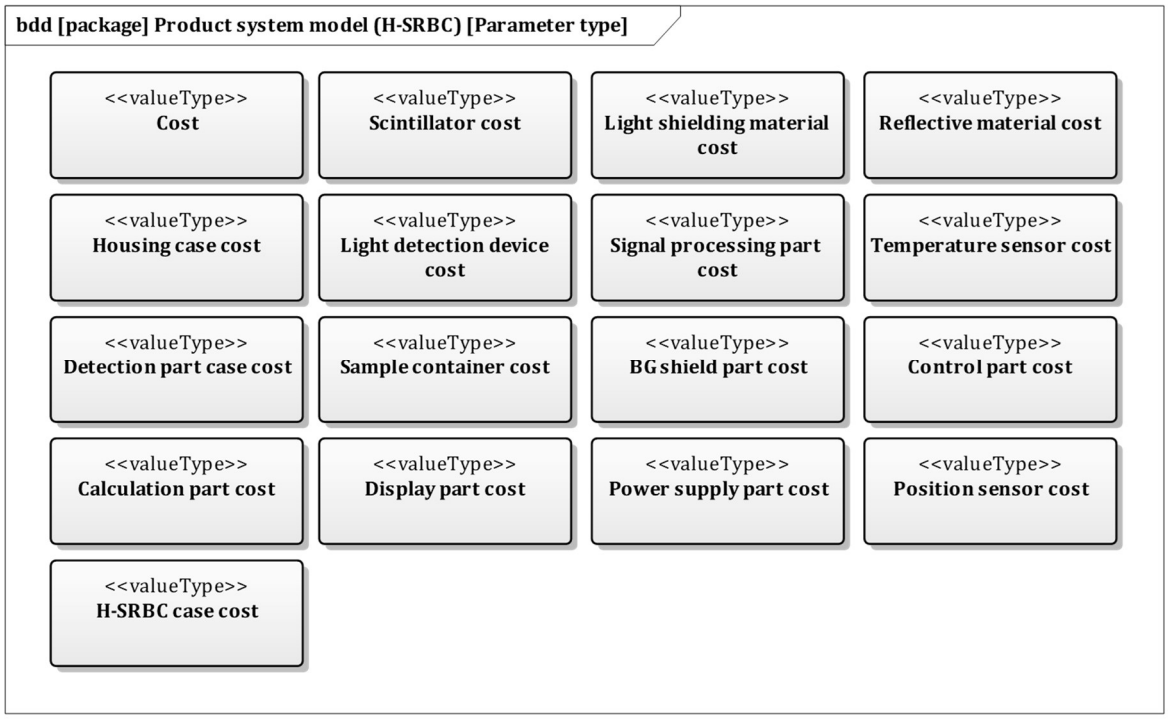


Fig. 4.25　Description result of parameter type.

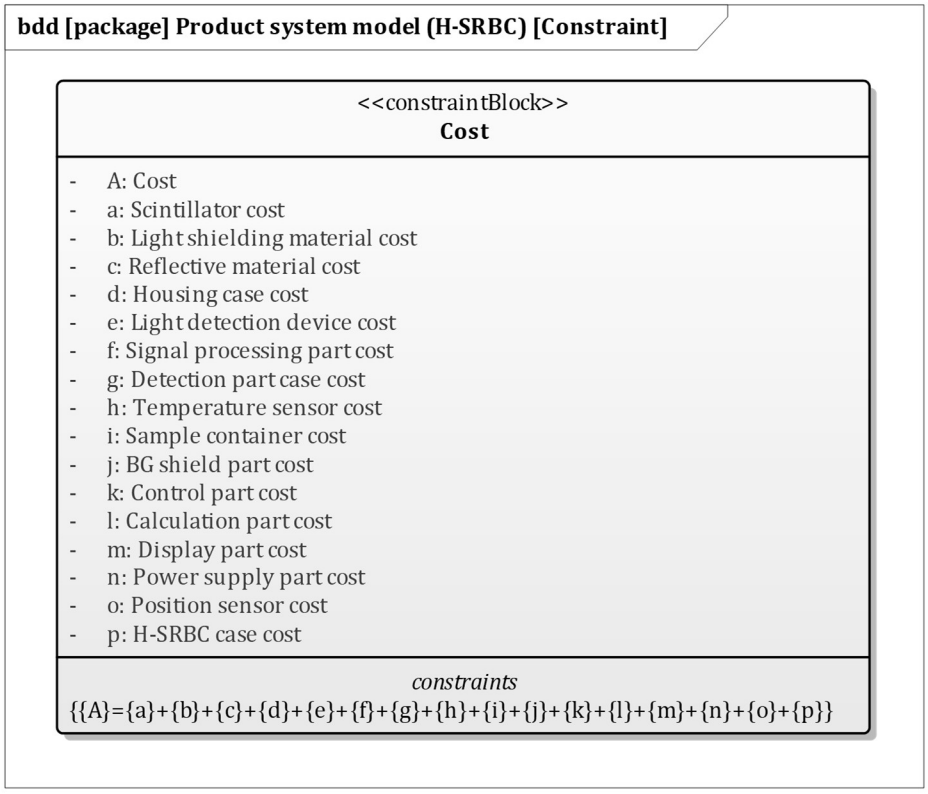


Fig. 4.26　Description result of constraint.

以上のように、理想システム構成に関する制約関係を定義し、モデルを記述することができた。製品システムモデルの記述ができたので、次に設計空間固有モデルの記述を行う。

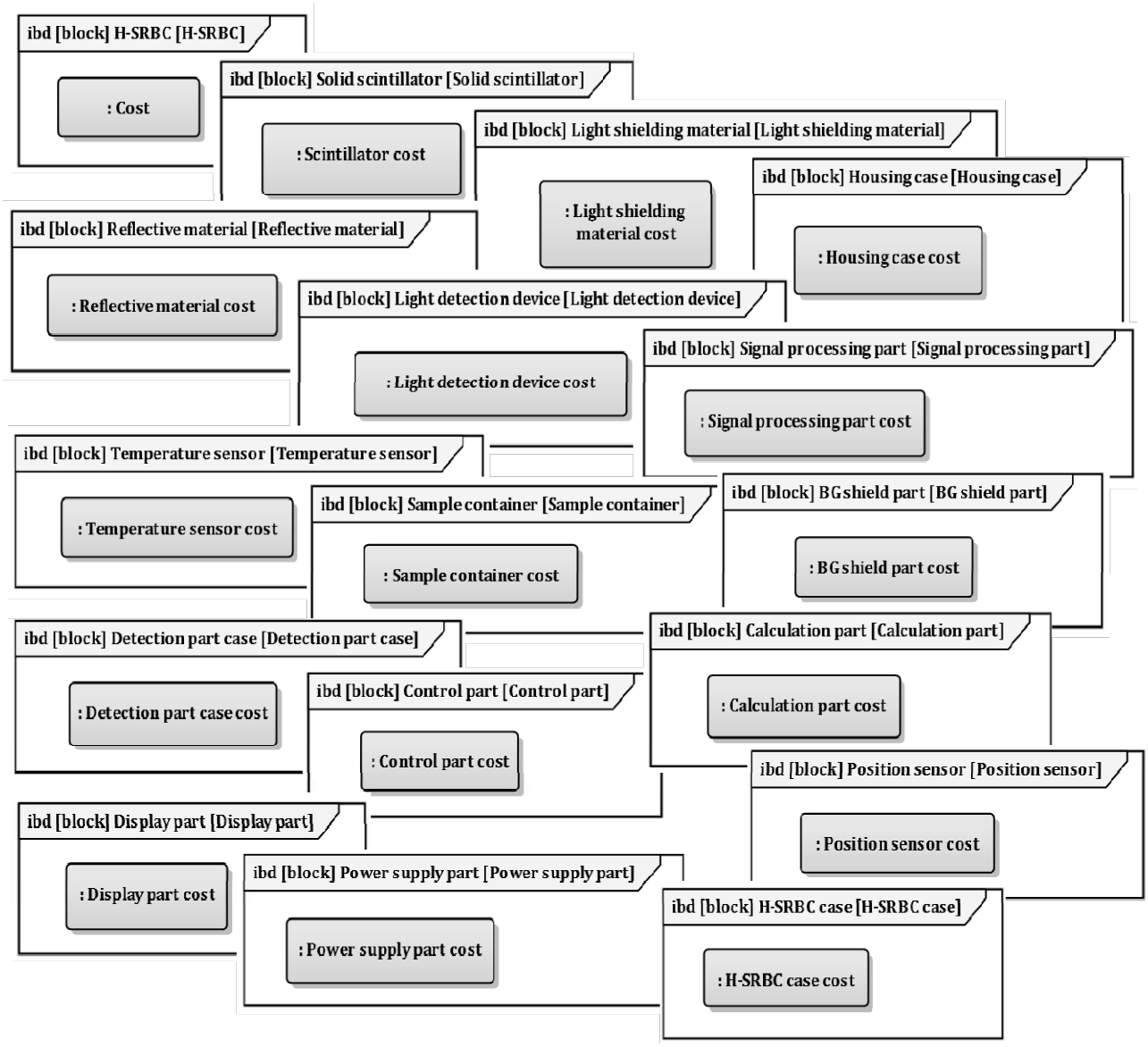


Fig. 4.27　Description result of assigning to system structure.

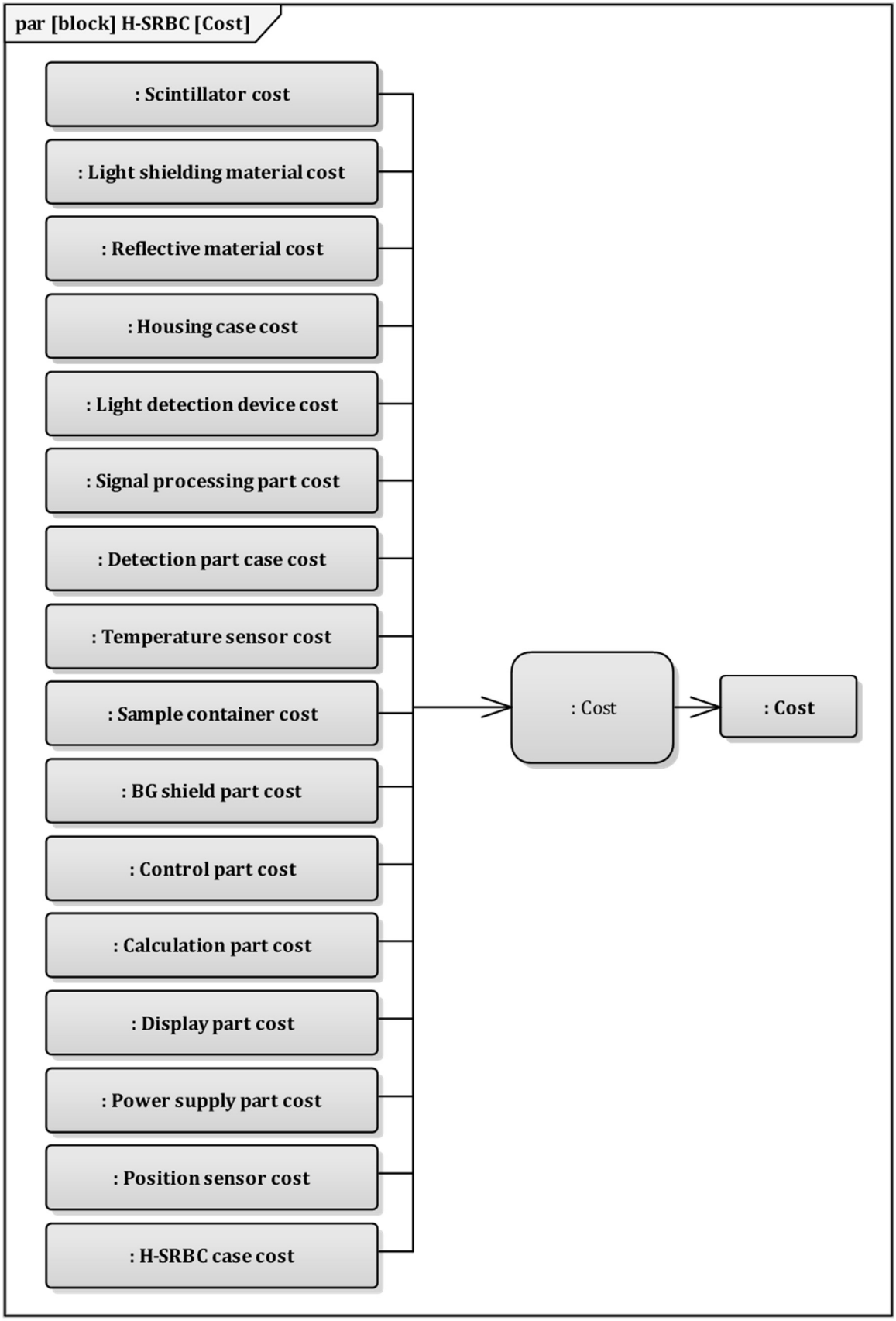


Fig. 4.28 Description result of constraint relationship.

4.3.3　設計空間固有モデルのモデリング結果

ここでは、放射線計測システムの基本設計にあたる設計空間固有モデルを表現するために、モデリングを行う。モデリングは、設計空間に関する要求の定義、設計空間に関する具体的なシステム構造の定義、その具体的なシステム構造に関する制約関係の定義、最適化問題の定義の順で行い、モデル記述方法に従ってモデルを記述する。

4.3.3.1　設計空間に関する要求の定義とモデル記述

まず、製品システムモデルで定義された要求を基に、具体的なシステム構造(例えば形状など)を導出するような要求まで詳細化する。

Fig. 4.29 に示すように、製品システムモデルの要求で定義されたシンチレータの大体積化という要求については、放射線が入射する面積を大きくする、放射線が入射する方向のシンチレータの厚さを厚くするという要求が導出される。つまり、面積、厚さを大きくできるような直方形のシンチレータが求められる。

Fig. 4.30 に示すように、製品システムモデルの要求で定義された放射線を遮蔽する距離

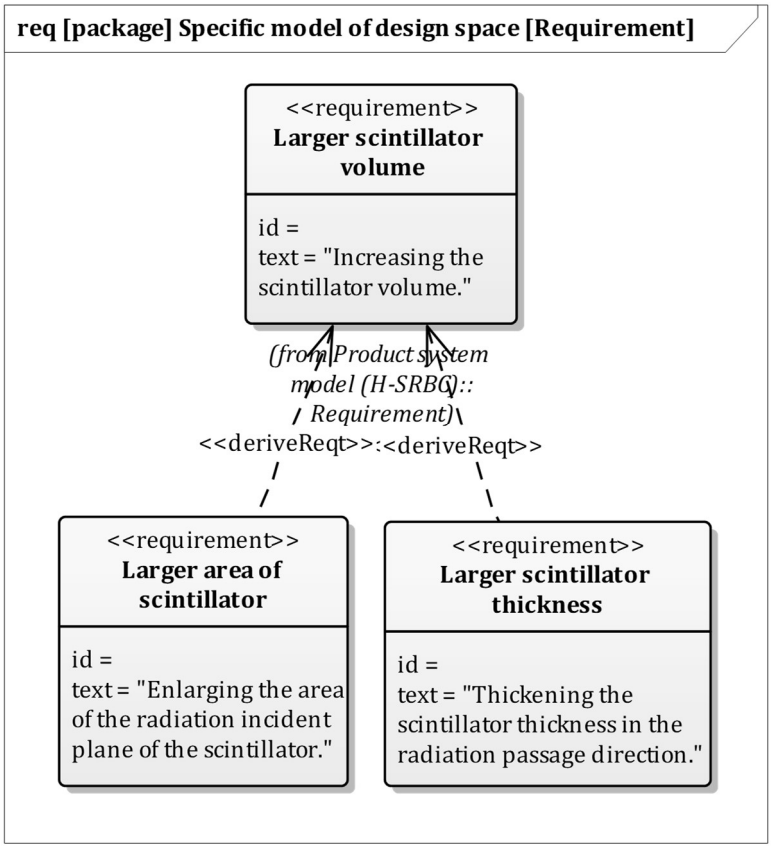


Fig. 4.29　Requirement of larger scintillator volume.

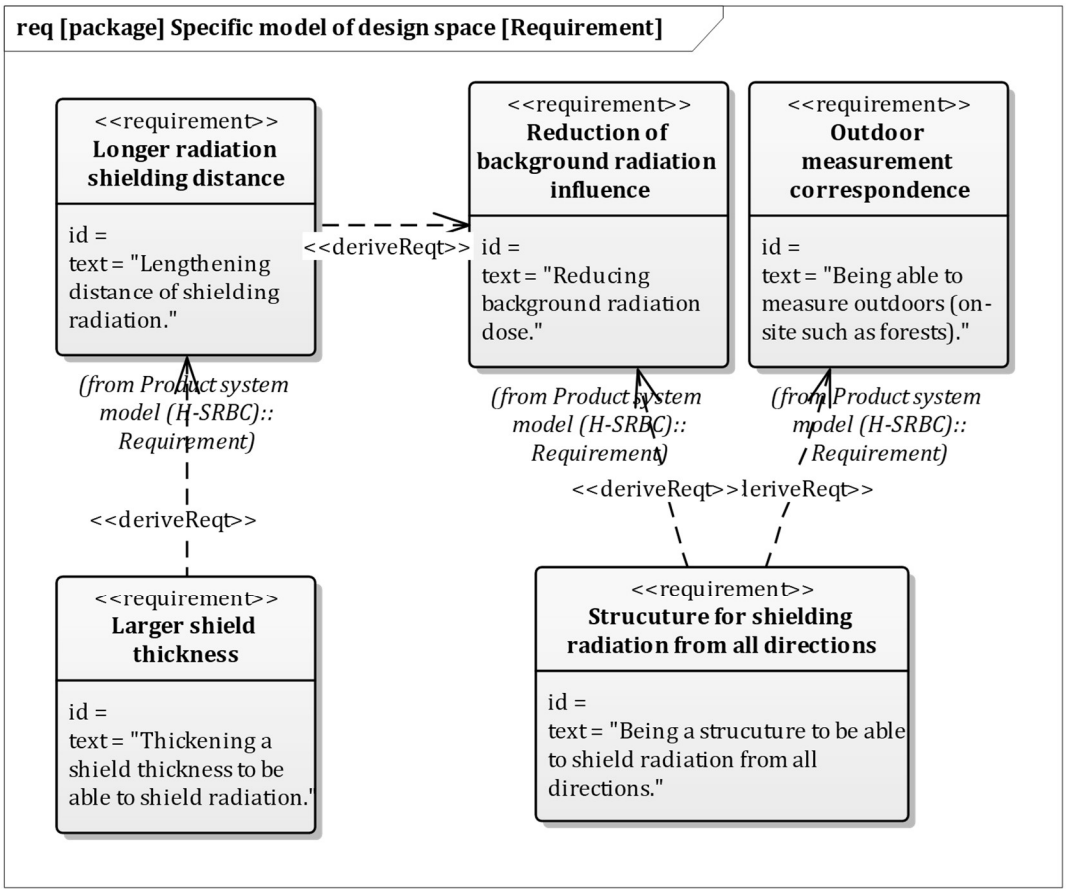


Fig. 4.30　Requirement of shilding radiation.

を長くするという要求には、遮蔽材の厚さを厚くするという要求が求められる。また、バックグラウンド放射線の影響を低減する要求や屋外計測への対応という要求については、屋外では放射線が全ての方向から入射する可能性があるため、全ての方向からの放射線を遮蔽できるような構造が求められる。

このようにして、製品システムモデルの要求をさらに分解、分析することで、具体的な構造に繋がる要求を定義することができる。同様にして他の要求についても定義、記述した。ここで載せていない残りの要求の定義、記述結果については付録に示す。

4.3.3.2　設計空間に関する放射線計測システムの具体的なシステム構造の定義とモデル記述

ここでは、設計意図や設計目的から具体化されたシステム構造を定義し、モデルを記述する。製品システムモデルで記述したシステム構成に対して、H-SRBC の具体的なシステム構造を記述した一部を、Fig. 4.31 に示す。Fig. 4.31 では、固体シンチレータの具体的な

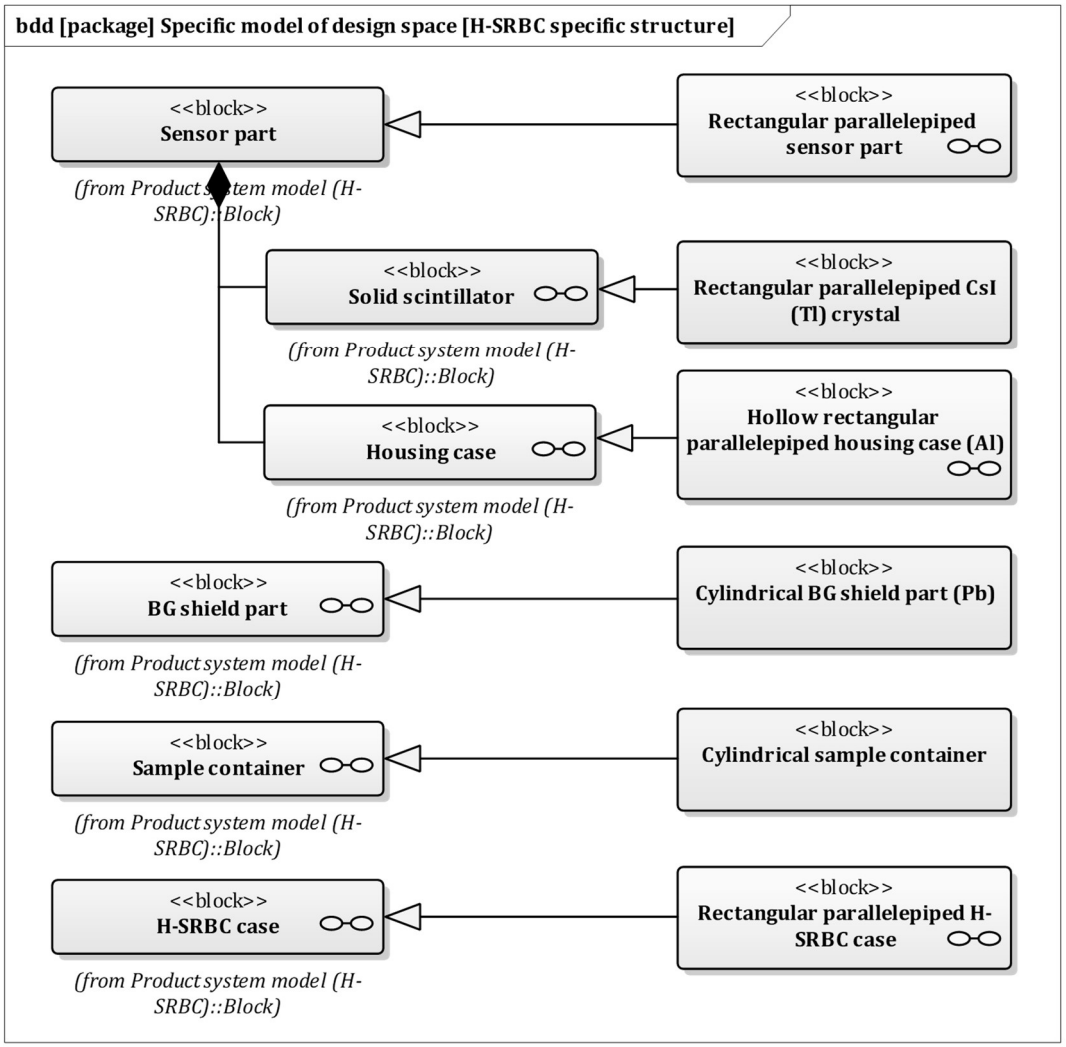


Fig. 4.31　Description result of specific system strucutre.

構造として直方形の CsI(Tl)シンチレータ結晶、ハウジングケースの具体的な構造として中空直方形の Al ハウジングケース、それらからセンサ部も直方形となっている。バックグラウンド遮蔽部に対しては円筒形の Pb 遮蔽部、サンプル容器に対しては円筒形のサンプル容器、H-SRBC ケースに対しては直方形の H-SRBC ケースが具体的な構造として記述されている。同様にして、具体的な部品や形状、材料などを記述することができた。残りの記述結果については、付録に示す。

4.3.3.3　具体的なシステム構造に関する制約関係の定義とモデル記述

ここでは、前述で定義した具体的なシステム構造に関する制約関係を定義し、モデルを記述する。これは、具体的なシステム構造が定義できたことで、形状や材料が関係する制

約関係も定義することができるためである。

製品システムモデルで、形状や材料に関係するためそれ以上の定義ができなかった放射能濃度計測に関する感度S_{Bq}の定式化を行う。この感度S_{Bq}は、形状によって決定される幾何学的効率と、入射した後シンチレータ結晶内部でγ線をどれだけ吸収するかという絶対効率によって効率が決定され、線量に対しその効率によってどれだけ検出できるかで決定される。感度S_{Bq}は、

$$S_{Bq} = N_{\gamma.min} \times E \tag{4.6}$$

で表される。$N_{\gamma.min}$は入射γ線数(/min)、Eは効率である。$N_{\gamma.min}$は、試料から放出されるγ線の数で、本研究では仕様を表す基準として国の基準である100Bq/kgの試料を仮定している。効率Eは、

$$E = E_g \times E_a \tag{4.7}$$

となり、E_gは幾何学的効率、E_aは絶対効率である。幾何学的効率E_gは、

$$E_g = \frac{1 - \cos\theta}{2} \tag{4.8}$$

で求められ、$\cos\theta$は、

$$\cos\theta = \frac{D_{sc}}{\sqrt{\left(\frac{W'}{2}\right)^2 + {D_{sc}}^2}} \tag{4.9}$$

で求められる。D_{sc}は試料とシンチレータ結晶の距離である。W'は、入射面を仮想的に正方形に見立てた場合の一辺(mm)で、

$$W' = \sqrt{W \times H} \tag{4.10}$$

で求められる。Wはシンチレータ横幅(mm)、Hはシンチレータ縦幅(mm)である。絶対効率E_aは、

$$E_a = 1 - e^{-\mu_m \times \frac{D}{1000} \times \rho} \tag{4.11}$$

で求められる。μ_mは質量減衰係数(m^2/kg)、Dはシンチレータの高さ(mm)、ρは密度(kg/m^3)である。μ_mとρはシンチレータ種類、ここではCsI(Tl)によって決定される値である。

上記の制約式に関して、ブロック定義図でパラメータの型および制約式、内部ブロック図で構造への割り当て、パラメトリック図で制約関係の記述を行った。パラメトリック図で記述した結果をFig. 4.32に示す。同様に他の制約関係についても記述することができた。

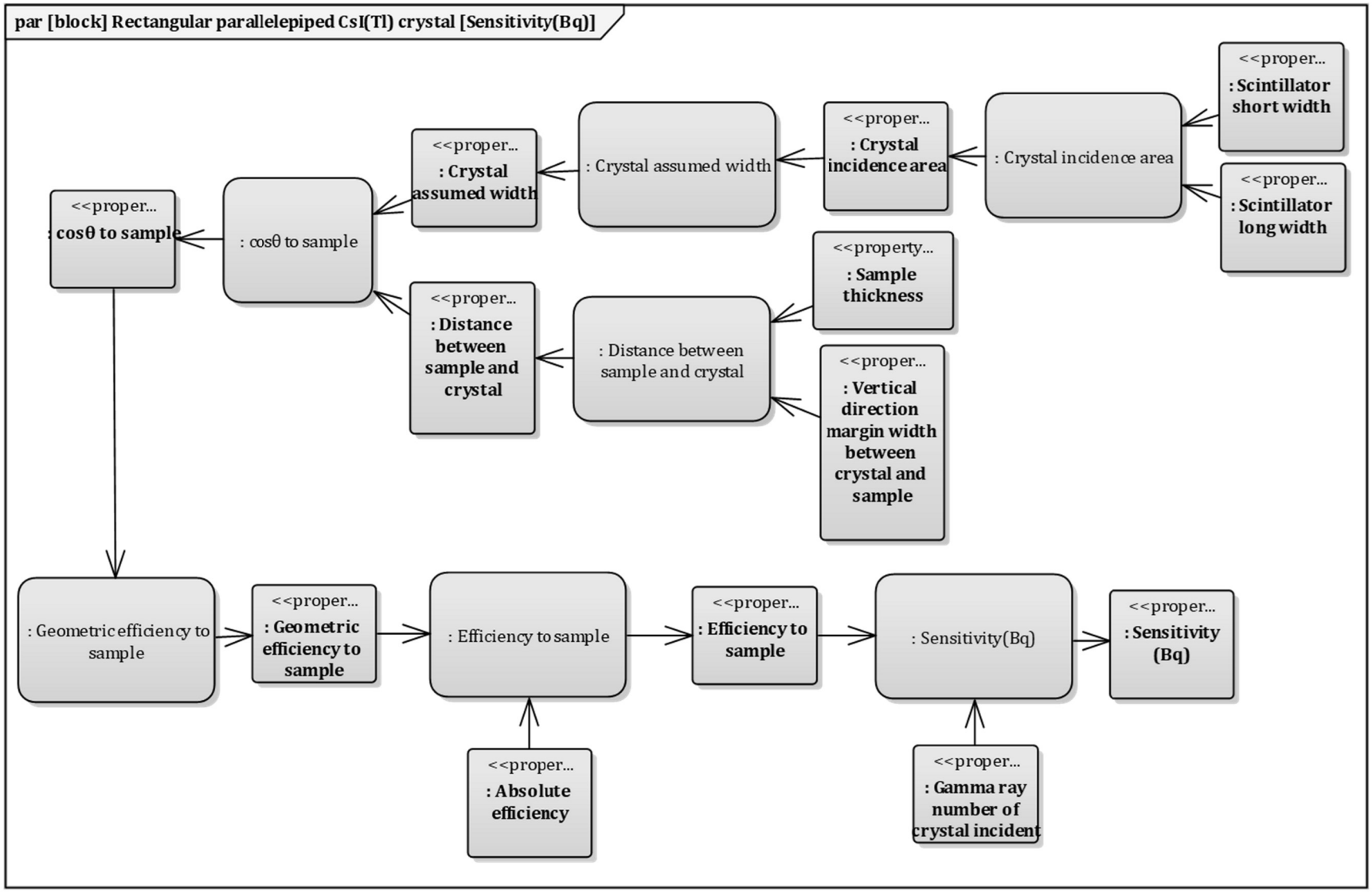


Fig. 4.32 Description result of constraint relationship.

4.3.3.4　最適化問題の定義とモデル記述

ここでは、最適化設計を行うための、パラメータの情報、最適化問題を定義し、モデルを記述する。要求を満たすような適正な設計解を導出するために、次のような最適化問題を設定した。まず、目的関数としては、感度、検出限界、分解能、コスト、重量、筐体サイズ、計測時間とし、感度は最大化、残りの目的関数は最小化する。評価指標 *SDSI-C* は次式のように定義する。

$$SDSI - C = \frac{S(cpm)}{DL(Bq/kg) \times R(\%) \times C(yen) \times W(g) \times V(cm^3) \times MT(min)} \tag{4.12}$$

Sは感度、DLは検出限界、Rは分解能、Cはコスト、Wは重量、Vは体積、MTは計測時間を表し、最適化では *SDSI-C* を最大化する。設計変数は、シンチレータの縦、横、厚さ、バックグラウンド遮蔽材の厚さ、計測時間、試料容器の半径、厚さとした。それぞれのパラメータはすでに定義されているので、最適化問題を記述するためのステレオタイプを用いて、Fig. 4.33 のように記述した。また、その他のパラメータについても、初期値や単位といったパラメータの情報を全て記述した。(付録参照)

以上、設計空間固有モデルを記述することができたので、次にツール連携アルゴリズム固有モデルのモデリングを行う。

4.3.4　ツール連携アルゴリズム固有モデルのモデリング結果

ここでは、放射線計測システムの基本設計から詳細設計へ繋ぐためのツール連携アルゴリズム固有モデルを表現するために、モデリングを行う。モデリングは、設計ツールの構成の定義、それらの設計ツールを連携するフローの定義の順で行い、モデル記述方法に従ってモデルを記述する。

4.3.4.1　設計ツールの構成の定義とモデル記述

本研究では、システムデザイン手法として SDSI-Cubic 手法を用いる。また、形状や配置といった実体情報をモデル化するために、設計ツールである CAD(Geant4)との連携を行う。したがって、SDSI-Cubic 手法が持つ機能に対して、どの設計ツールを利用して実現するか、その設計ツールの構成を定義し、ブロック定義図を用いて記述を行った。記述結果は、3 章で述べた Fig. 3.29 と同様であるため、それを参照とする。

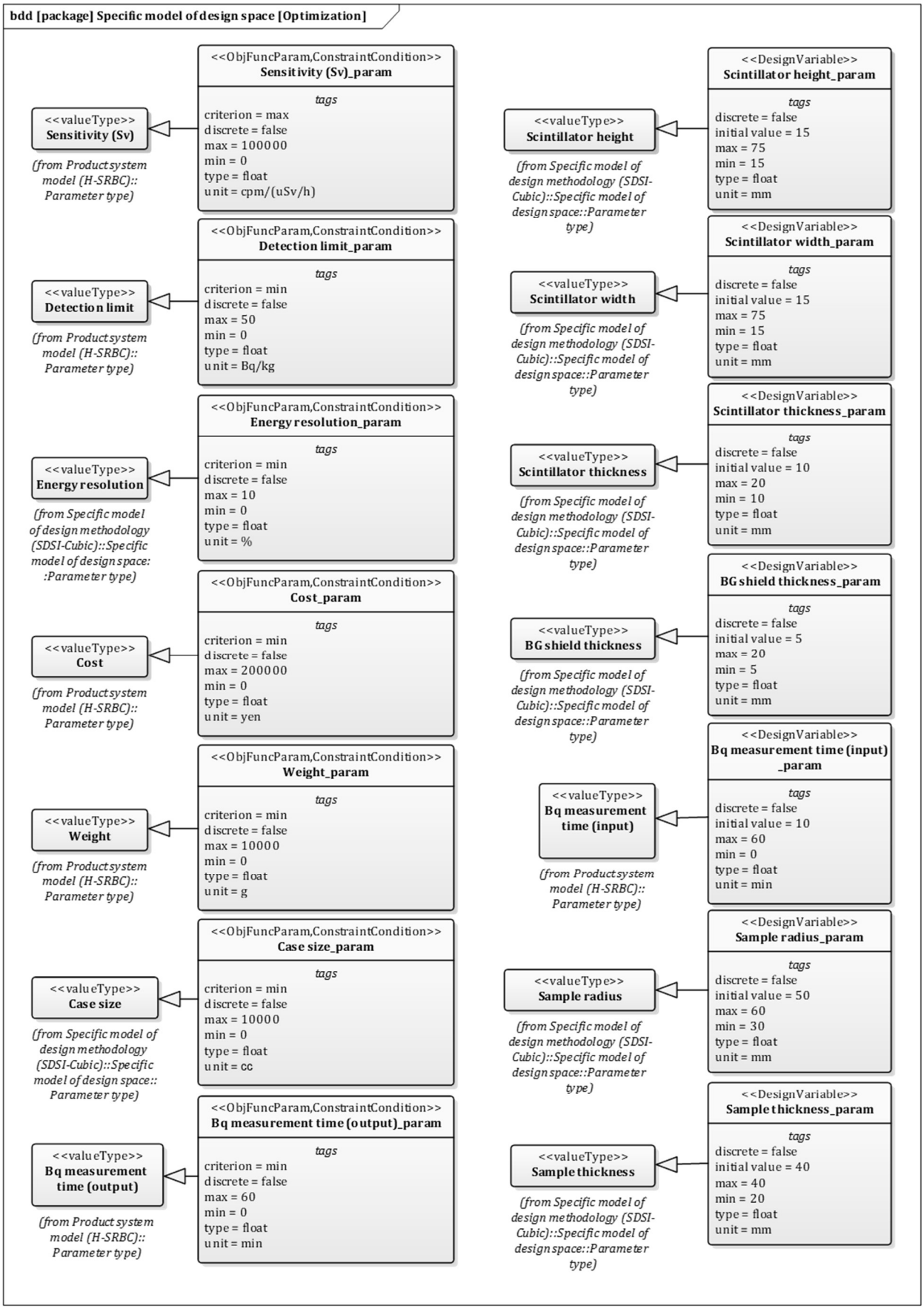


Fig. 4.33 Description result of optimization problem.

4.3.4.2　設計ツールを連携するフローの定義とモデル記述

次に、設計ツールを連携するフローの定義を行う。記述はアクティビティ図を用いて行い、ツールが果たす機能とその流れを定義する。ここでは、SDSI-Cubic 手法の機能の流れを踏襲し、また CAD(Geant4)ツールを連携して 3 次元形状の構築も行う機能を含めて定義し、記述を行った。記述結果は、3 章で述べた Fig. 3.30 と同様であるため、それを参照とする。

以上､設計ツールの構成の定義､それらの設計ツールを連携するフローの定義を含むツール連携アルゴリズム固有モデルを記述することができたので、次に、CAD(Geant4)を連携するための設計ツール固有モデルのモデリングを行う。

4.3.5　設計ツール固有モデルのモデリング結果

ここでは、放射線計測システムの詳細設計へと設計情報を連携するための設計ツール固有モデルを表現するために、モデリングを行う。モデリングは、CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義の順で行い、モデル記述方法に従ってモデルを記述する。

4.3.5.1　CAD(Geant4)のためのシステム構造の定義とモデル記述

まず、設計空間固有モデルで記述したシステム構造に対し、CAD(Geant4)のための構造情報を定義し、モデルを記述する。

H-SRBC の具体的なシステム構造に対して、CAD(Geant4)用の構造を記述した一部を、Fig. 4.34～Fig. 4.39 に示す。これらは、直方形 CsI(Tl)シンチレータ結晶に関して、配置、形状、材料を記述したものである。Fig. 4.34 では、シンチレータ結晶の配置について記述している。シンチレータ結晶は直方形センサ部に含まれているため、センサ部の 1 つの構造として配置される。配置に必要な情報である、基準となる母体の指定、実体をいくつ配置するかのコピー数、回転の指定、重心の X、Y、Z 位置、配置する実体の指定の情報を記述している。Fig. 4.35 では、シンチレータ結晶の実体について記述している。実体には、実体名、形状の指定、材料の指定の情報が必要であり、それらを記述している。Fig. 4.36 では、シンチレータ結晶の形状について記述している。設計空間固有モデルで直方形と定義されているので、ここでは箱型の形状を選択し、箱型形状について記述している。箱型

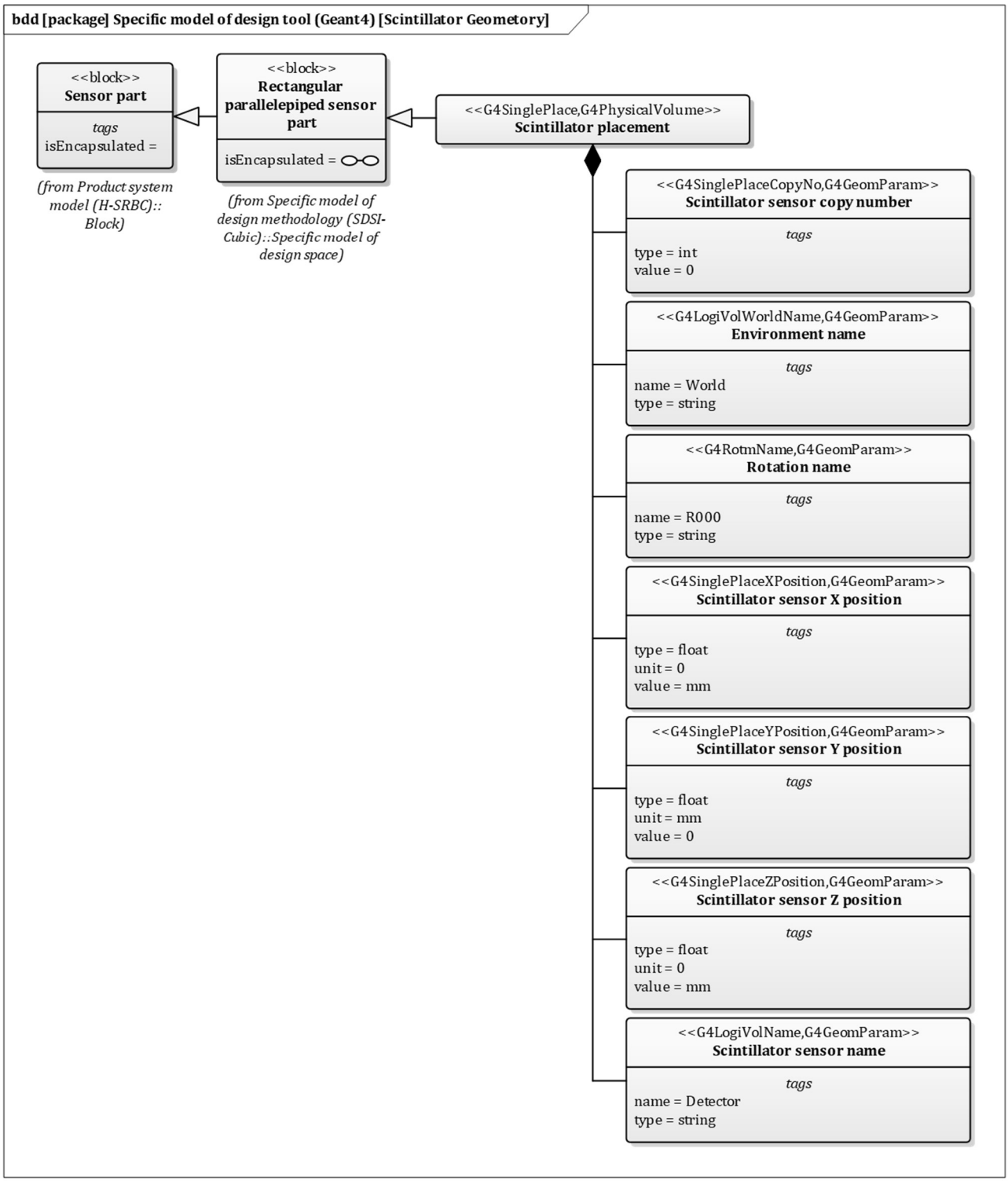


Fig. 4.34　Description result of placement information.

形状には、形状名、重心を原点とした X、Y、Z の距離の情報が必要であり、それらを記述している。Fig. 4.37 では、シンチレータ結晶の材料について記述している。設計空間固有モデルで CsI と定義されているので、ここでは CsI の材料について記述している。CsI

は Cs と I の 2 元素からなる結晶であるため、2 元素を合わせる情報である、材料名、密度、元素数、Cs 元素の指定、Cs の重量比、I 元素の指定、I の重量比の情報を記述している。Fig. 4.38、Fig. 4.39 では、Cs 元素、I 元素の定義をそれぞれ記述している。材料元素に必要な、元素名、元素記号、原子番号、原子量の情報を記述している。これらの情報により、Geant4 でシンチレータ結晶の 3 次元 CAD モデルを生成することができる。

以上のように、設計空間固有モデルで記述したシステム構造に対して、Geant4 で 3 次元 CAD モデルを生成するための構造情報を記述することができた。他のシステム構成要素に関しても同様に記述することができた。それらの記述結果は、付録に示す。

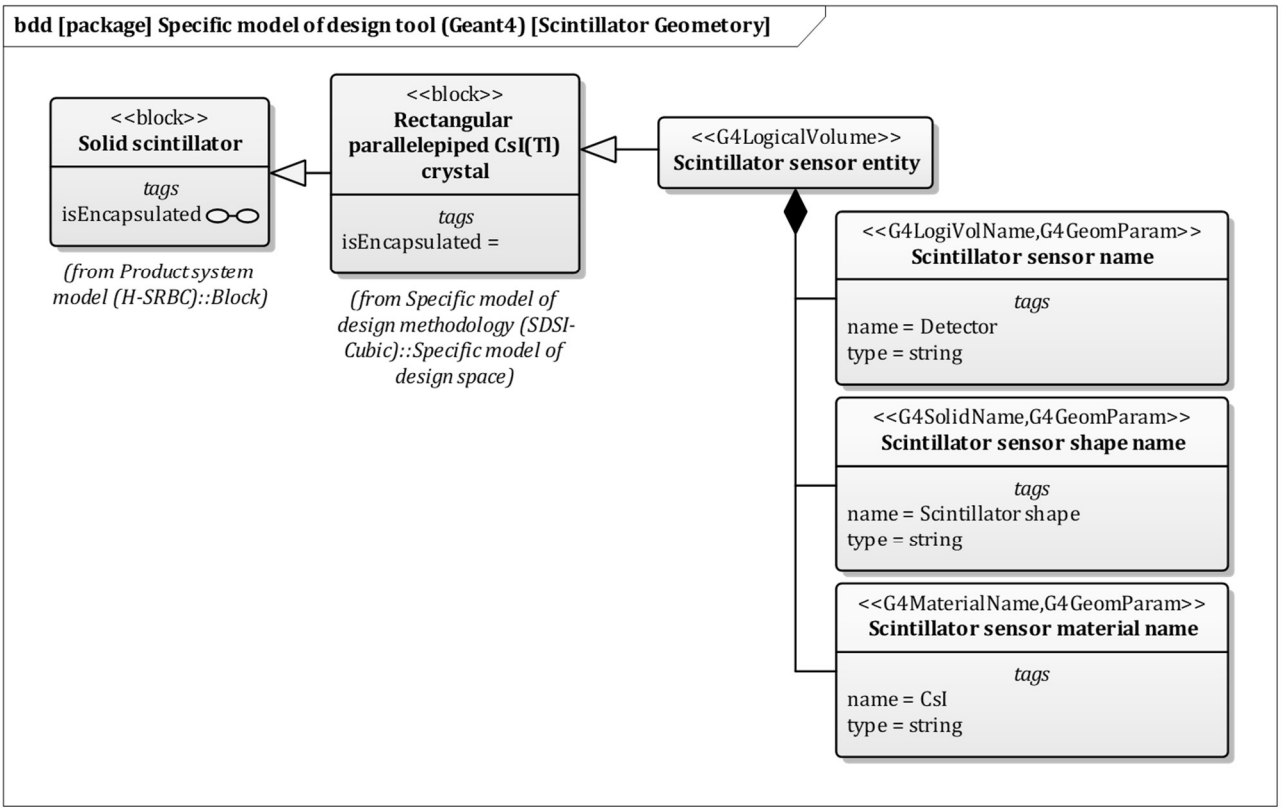


Fig. 4.35　Description result of entity information.

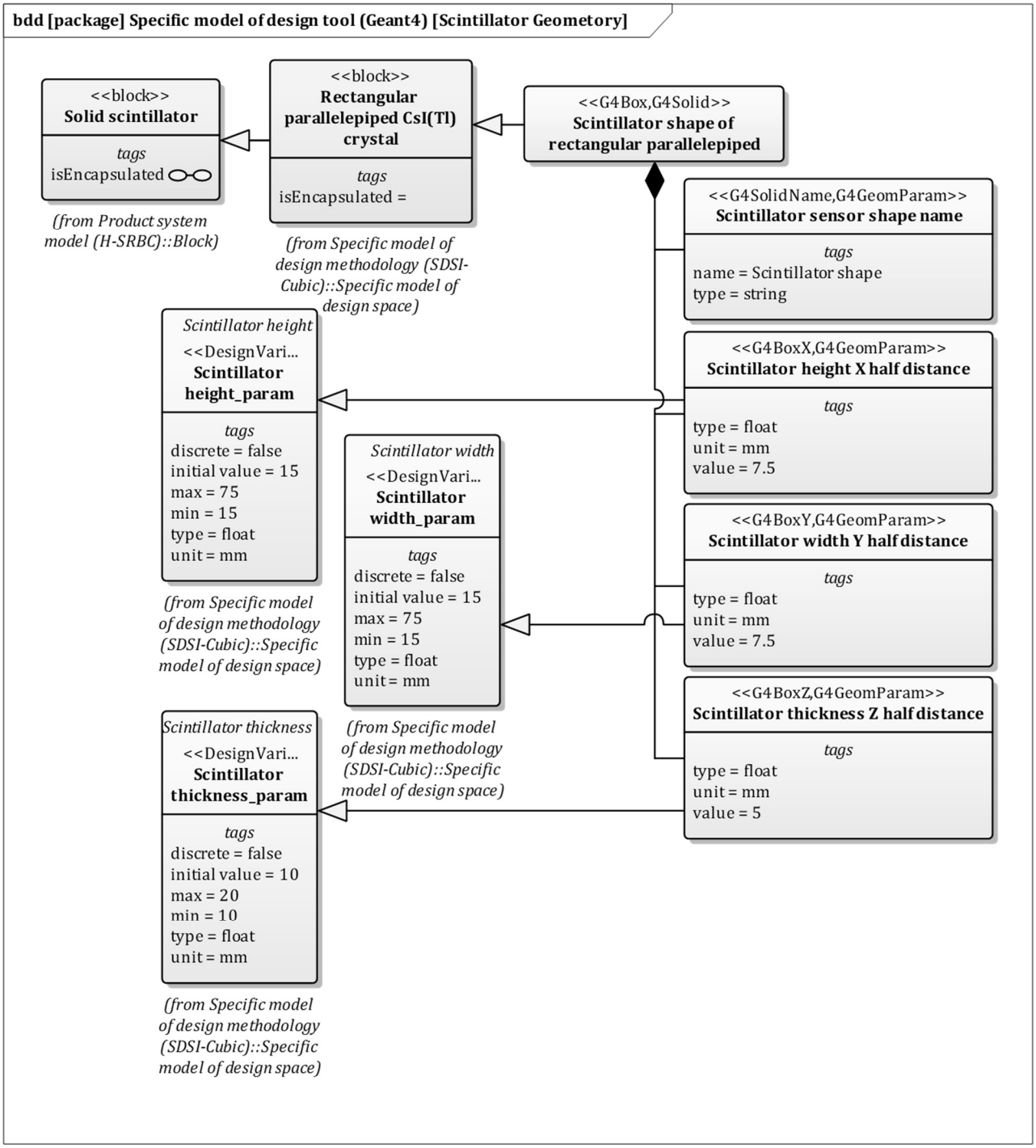


Fig. 4.36 Description result of shape information.

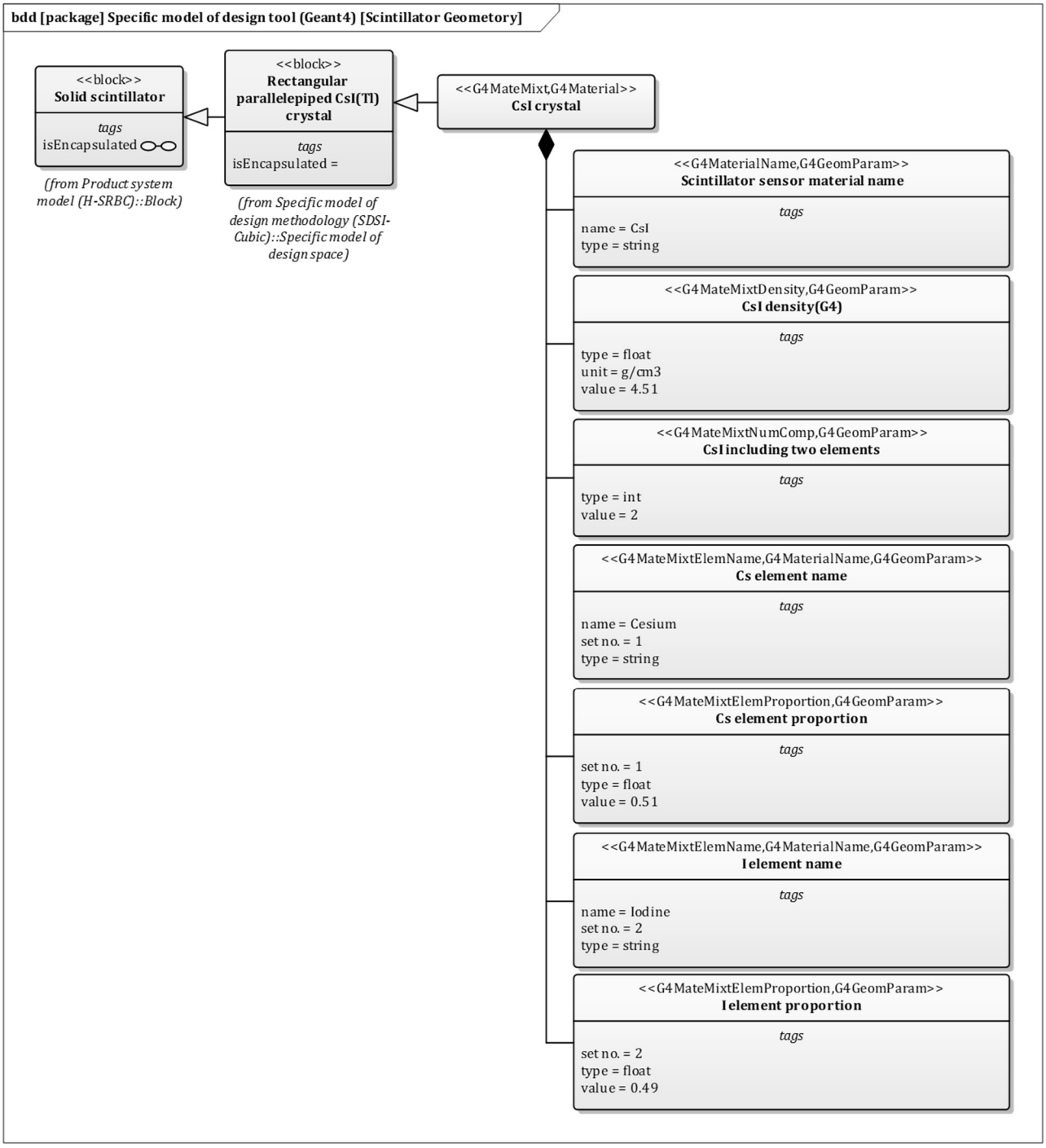


Fig. 4.37 Description result of material information.

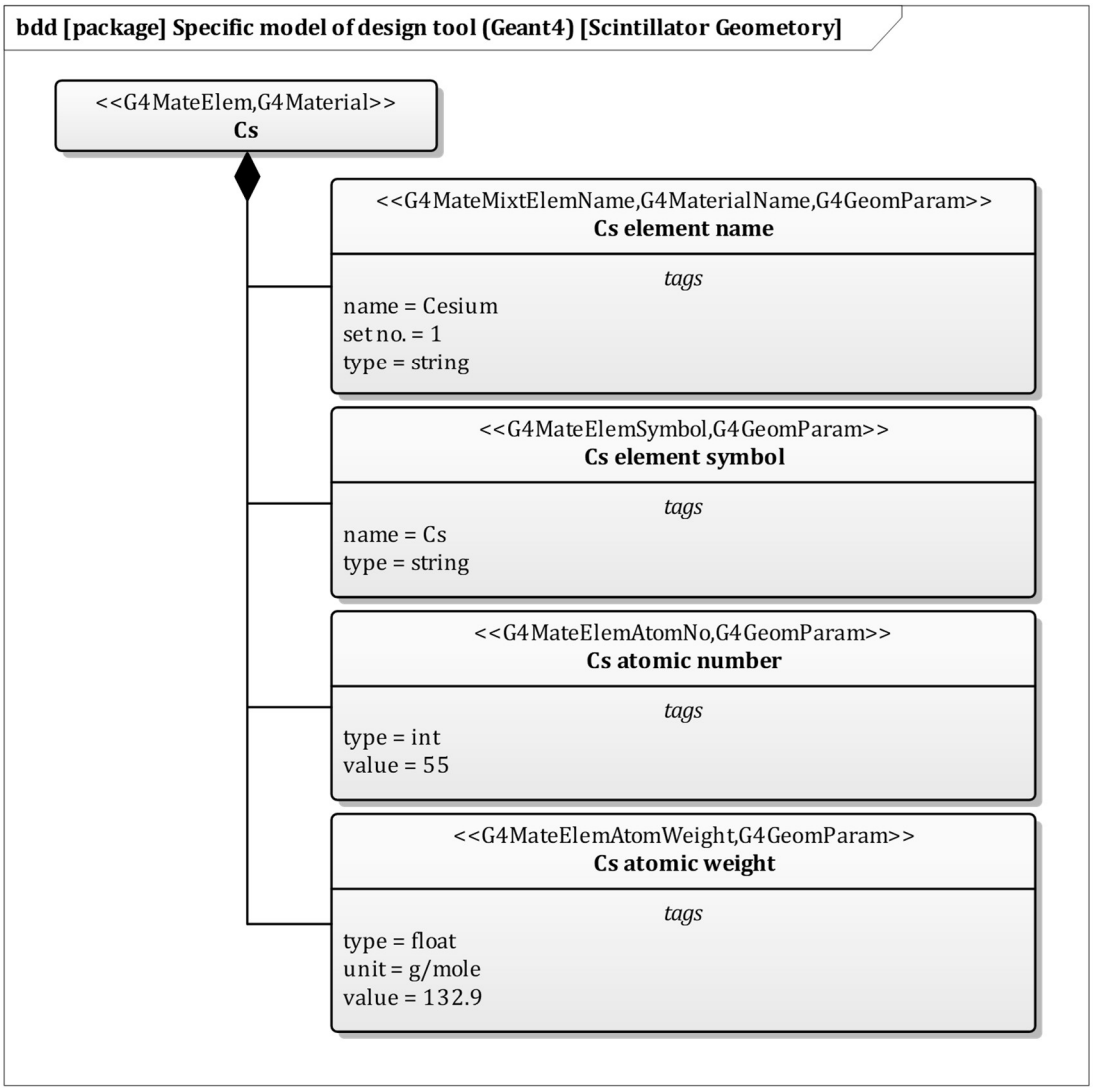


Fig. 4.38 Description result of element information (Cs).

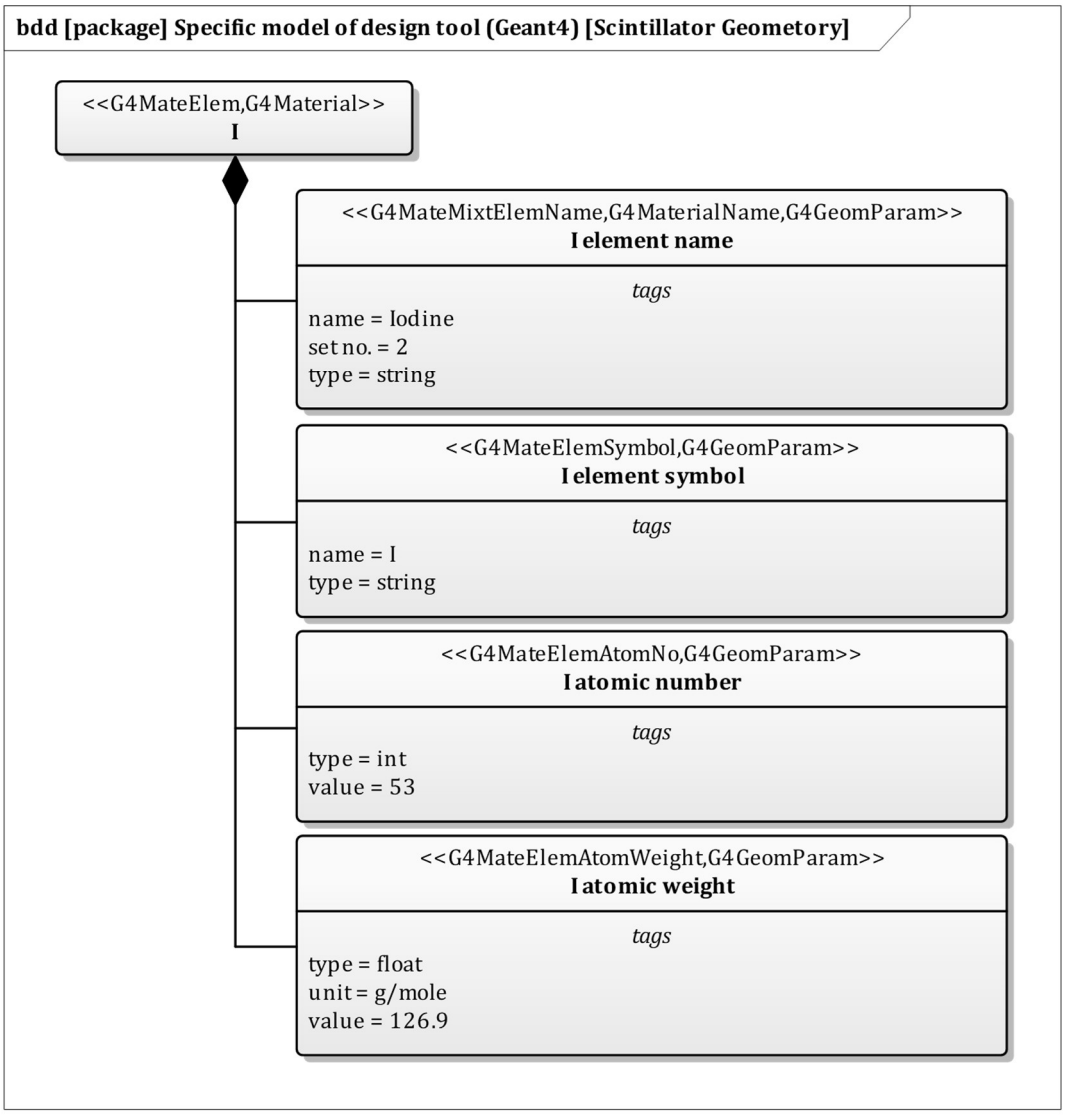


Fig. 4.39　Description result of element information (I).

4.3.5.2　CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の定義とモデル記述

次に、前述の CAD(Geant4)のためのシステム構造を定義したことによって必要になった構造に関する制約関係と、製品システムモデルおよび設計空間固有モデルとの間に生じる制約関係を定義し、モデルを記述する。

CAD(Geant4)に関する制約関係を記述した一部を、Fig. 4.40、Fig. 4.41 に示す。これらは、設計空間固有モデルと、前述で定義した Geant4 のためのシステム構造情報との間の制約関係について記述したものである。具体的には、シンチレータ結晶の縦、横、厚さパラメータの関係と、CsI の密度パラメータの関係を記述している。Fig. 4.40 では、ブロック定義図

を用いて制約式を記述しており、Fig. 4.41 では、パラメトリック図を用いて制約関係の可視化を行っている。

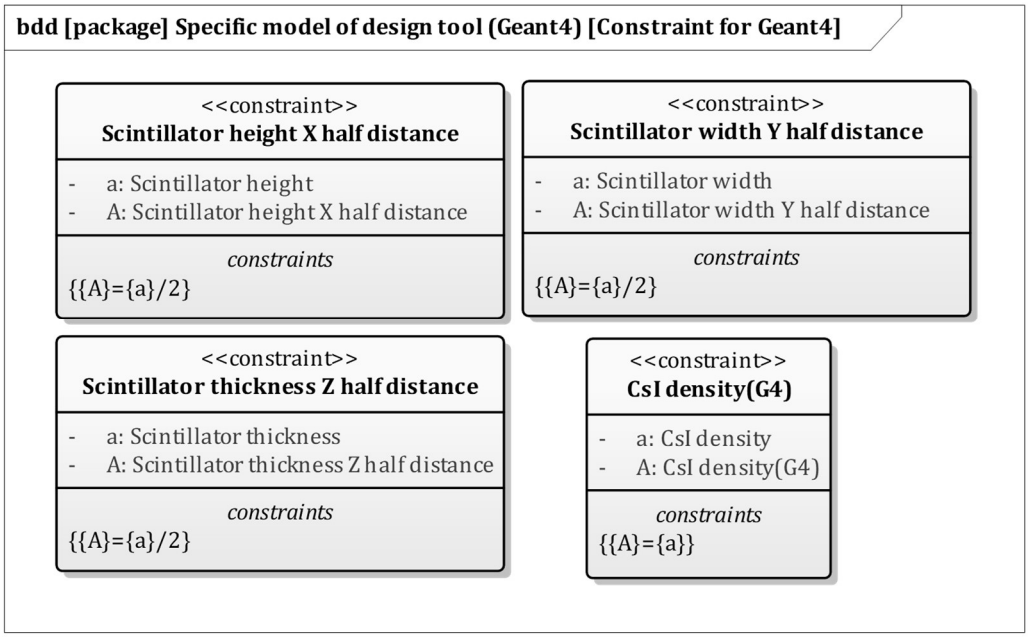


Fig. 4.40　Description result of constraint.

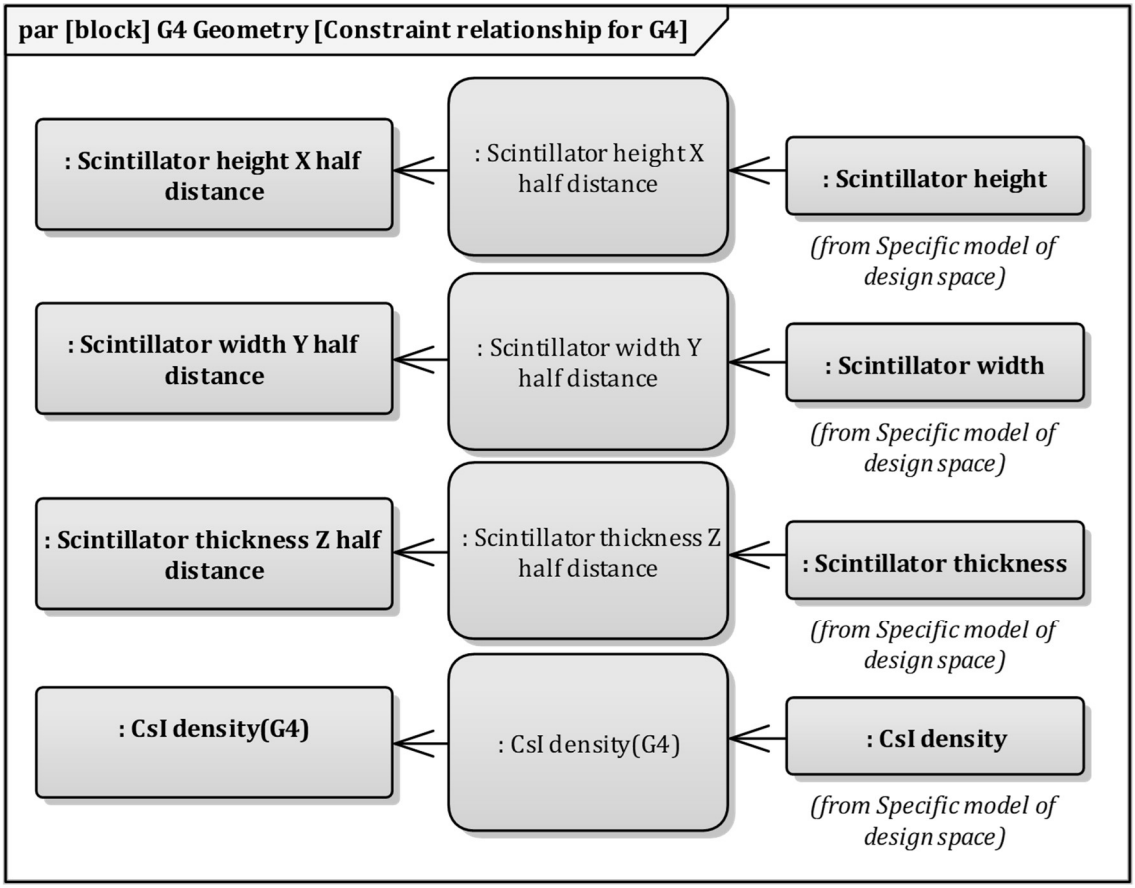


Fig. 4.41　Description result of constraint relationship.

以上のように、Geant4 で 3 次元 CAD モデルを生成するための構造情報に関する制約関係を記述することができた。他の構造要素に関しても同様に記述することができた。それらの記述結果は、付録に示す。

これまでの検討で、設計ツール固有の情報、ここでは Geant4 で 3 次元 CAD モデルを生成するための情報をモデリングすることができた。設計ツール固有モデルに記述した情報を用いて、Geant4 用の入力ファイルの形式に変換した結果を Fig. 4.42 に、Geant4 で生成し出力した 3 次元 CAD モデル(VRML 形式)を Fig. 4.43 に示す。ここでは、放射線計測システムの設計で重要なセンサ部(シンチレータ結晶＋ハウジングケース)をモデル化している。

g4geom_input.txt - メモ帳

ファイル(F) 編集(E) 書式(O) 表示(V) ヘルプ(H)

```
:SOLID WorldShape BOX 50 50 50
:VOLU World WorldShape G4_AIR

:ROTM R000 0 0 0

:ELEM Cesium Cs 55 132.9
:ELEM Iodine I 53 126.9
:MIXT CsI 4.51 2 Cesium 0.51 Iodine 0.49
:SOLID ScintillatorShape BOX 7.5 7.5 5
:VOLU Detector ScintillatorShape CsI
:PLACE Detector 0 World R000 0 0 0

:MATE Aluminum 13 26.98 2.7
:SOLID HousingCaseOuterShape BOX 9.5 9.5 7
:SOLID HousingCaseInnerShape BOX 7.5 7.5 5
:SOLID HousingCaseShape SUBTRACTION HousingCaseOuterShape HousingCaseInnerShape R000 0 0 1
:VOLU HousingCaseEntity HousingCaseShape Aluminum
:PLACE HousingCaseEntity 0 World R000 0 0 -1
```

Fig. 4.42　Input file of Geant4.

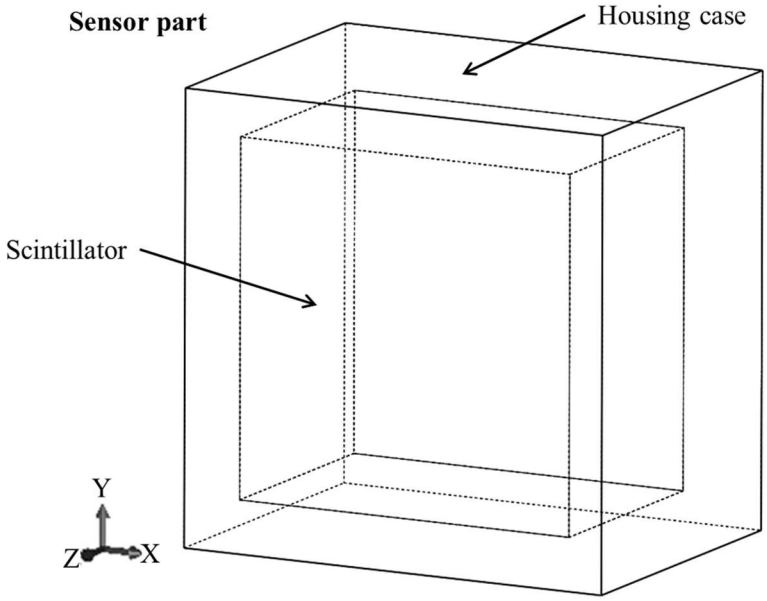


Fig. 4.43　3D-CAD model.

4.4　応用展開の結果と考察

4.4.1　SDSI-Cubic フレームワークを用いた最適化設計の実行結果と考察

前述でモデリングした結果を用いて、SDSI-Cubic フレームワークを用いた最適化設計を行った。ここでは簡単に述べるが、H-SRBC は Fig. 4.44 に示すような構造であり、最適化問題は Table 4.6 に示す目的関数、設計変数である。本研究では、式(4.12)に示す評価指標 *SDSI-C* を最大にする解を適正設計解とする。

まず、H-SRBC に内包される複雑な依存関係を整理するため、設計タスク抽出を行った。結果を Table 4.7 に示す。Table 4.7 に示すように、16 個の設計タスクが抽出されている。つまり、H-SRBC に内包する設計問題は、16 個の設計タスクで整理できることがわかった。

次に、DSM(Design Structure Matrix)とパーティショニングを用いて、設計ワークフロー構築を行った。結果を Fig. 4.45 に示す。Fig. 4.45 では、16 個の設計タスクに加えて、最適化のフィードバックを扱うための設計変数タスク(designTask00～deginTask06)が追加されている。Fig. 4.45 で示すように、designTask1/13/2/15 は設計変数に関係しない設計タスクであるため最適化には含まれず、残りの設計タスクは全て最適化に関係する設計ワークフローが構築できた。また、この結果を基に、I-sight 上に構築された最適化実行ワークフローを Fig. 4.46 に示す。

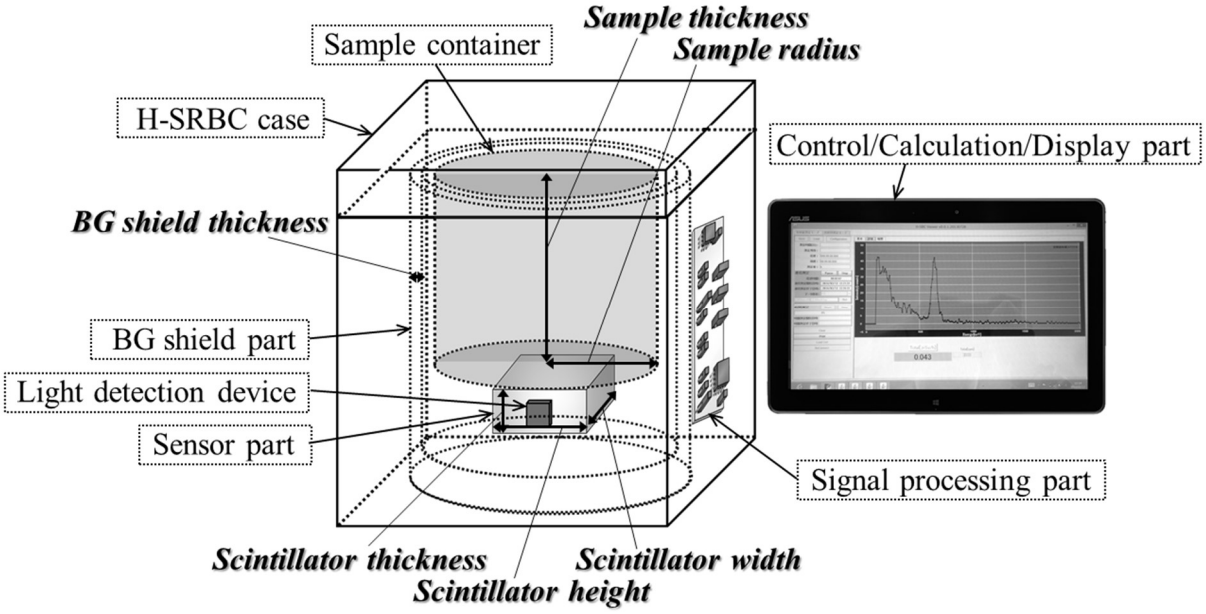


Fig. 4.44　Schematic of H-SRBC.

Table 4.6 List of objective function and design variable.

Objective function	Unit	Criterion	Constraint condition
Sensitivity	cpm/(μSv/h)	Max.	
Detection limit	Bq/kg	Min.	$DL \leqq 50$
Energy resolution	%	Min.	$R \leqq 10$
Cost	yen	Min.	$C \leqq 200{,}000$
Weight	kg	Min.	$W \leqq 10$
Case size	cm^3	Min.	
Bq measurement time	min	Min.	$MT \leqq 60$

Design variable	Unit	Range
Scintillator height	mm	$15 \leqq x \leqq 75$
Scintillator width	mm	$15 \leqq x \leqq 75$
Scintillator thickness	mm	$10 \leqq x \leqq 20$
BG shield thickness	mm	$5 \leqq x \leqq 20$
Sample radius	mm	$30 \leqq x \leqq 60$
Sample thickness	mm	$20 \leqq x \leqq 40$
Bq measurement time	min	$0 < x \leqq 60$

Table 4.7 Result of design task extraction.

designTask No.	Design task detail
designTask1	System specification input
designTask2	Light detection device characterization
designTask3	Sample container design
designTask4	Sensor part design
designTask5	Sample radioactivity calculation
designTask6	Measurement part design
designTask7	BG shield part weight calculation
designTask8	BG shield part deign
designTask9	H-SRBC case design
designTask10	Solid scintillator design
designTask11	Detection part design
designTask12	H-SRBC cost and weight calculation
designTask13	Ambient radiation calculation
designTask14	Sensitivity calculation
designTask15	Light detection device design
designTask16	Measurement part performance design

		designTask1	designTask13	designTask2	designTask15	designTask00	designTask01	designTask02	designTask03	designTask04	designTask05	designTask06	designTask10	designTask11	designTask12	designTask14	designTask16	designTask3	designTask4	designTask5	designTask6	designTask7	designTask8	designTask9
		8	12	16	14	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	13	15	17	18	19	20	21	22	23
designTask1	8	8																						
designTask13	12	1	12																					
designTask2	16	1		16																				
designTask15	14	1		1	14																			
designTask00	1					1								1	1	1	1							1
designTask01	2						2							1	1	1	1						1	1
designTask02	3							3						1	1	1	1		1		1			1
designTask03	4								4					1	1	1	1		1		1			1
designTask04	5									5				1	1	1	1		1		1		1	1
designTask05	6										6			1	1	1	1	1					1	1
designTask06	7											7		1	1	1	1	1			1		1	1
designTask10	9	1											9								1			
designTask11	10	1		1										10							1			
designTask12	11	1			1								1		11							1		
designTask14	13	1	1							1						13			1		1			
designTask16	15	1				1										1	15				1		1	
designTask3	17	1									1	1						17						
designTask4	18	1						1	1	1									18					
designTask5	19	1																1		19				
designTask6	20	1						1	1	1		1								1	20			
designTask7	21	1																				21	1	
designTask8	22	1					1			1	1	1									1		22	
designTask9	23	1																					1	23

Optimization

Fig. 4.45 Result of DSM partitioning.

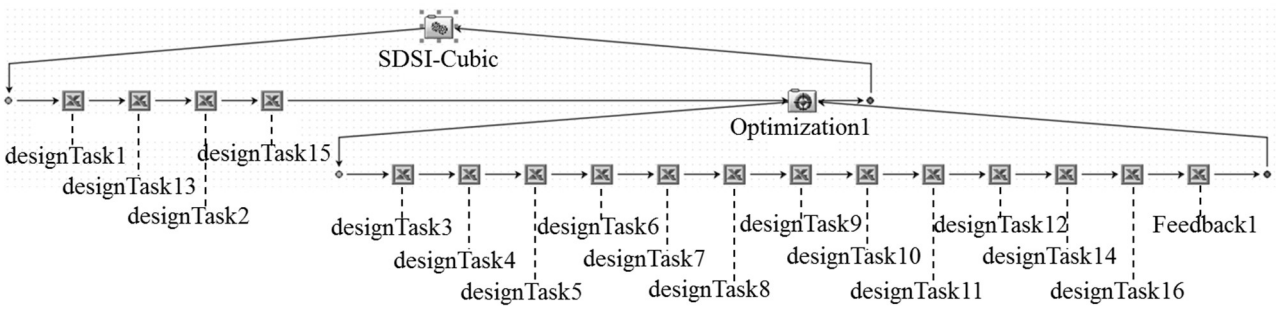


Fig. 4.46 Result of constructed optimization execution flow.

最適化は、I-sight 上で多目的最適化手法 NSGA2 (個体数 40、世代数 250 を設定)を用いて実行した。実行結果のパレート解および評価指標 *SDSI-C* を最大にする解を、Fig. 4.47～Fig. 4.52 に示す。各グラフでは、関係の強い目的関数を軸に比較しているが、プロットしているデータは同じパレート解である。Fig. 4.47 はコストと感度の関係を示し、シンチレータを大きくすることで高感度化できるがコストは増大してしまうといった相反する関係が表れている。Fig. 4.48 は分解能と感度の関係を示し、シンチレータを小さくすることで分解能を向上できるが感度は低下してしまうといった相反する関係が表れている。Fig. 4.49 は検出限界と重量の関係を示し、バックグラウンド遮蔽材を厚くすることで検出限界を向上できるが重量は重くなってしまうといった相反する関係が表れている。Fig. 4.50 は計測時間と検出限界の関係を示し、計測時間を短くすると検出限界が高くなってしまうといった相反する関係が表れている。Fig. 4.51 は計測時間と重量の関係を示し、計測時間を短くするためにはバックグラウンド遮蔽材を厚くして遮蔽効果を高める必要があり、重量が重くなってしまうといった相反する関係が表れている。Fig. 4.52 は検出限界と感度の関係を示し、検出限界と感度は同時に向上されることができるが、その他の目的関数の評価によって、理想点に近い解でも適正解にはなっていないことが表れている。

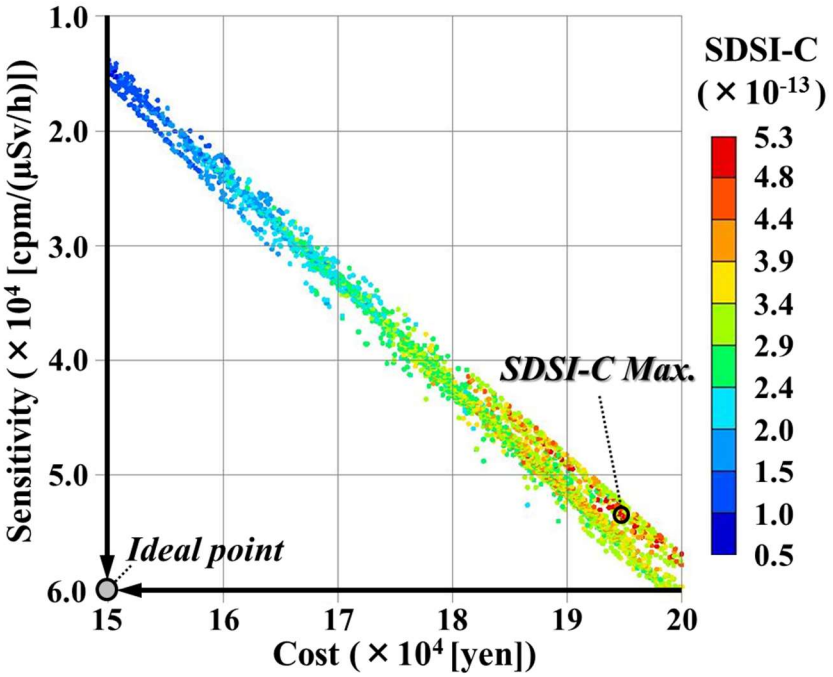


Fig. 4.47　Comparison of cost and sensitivity.

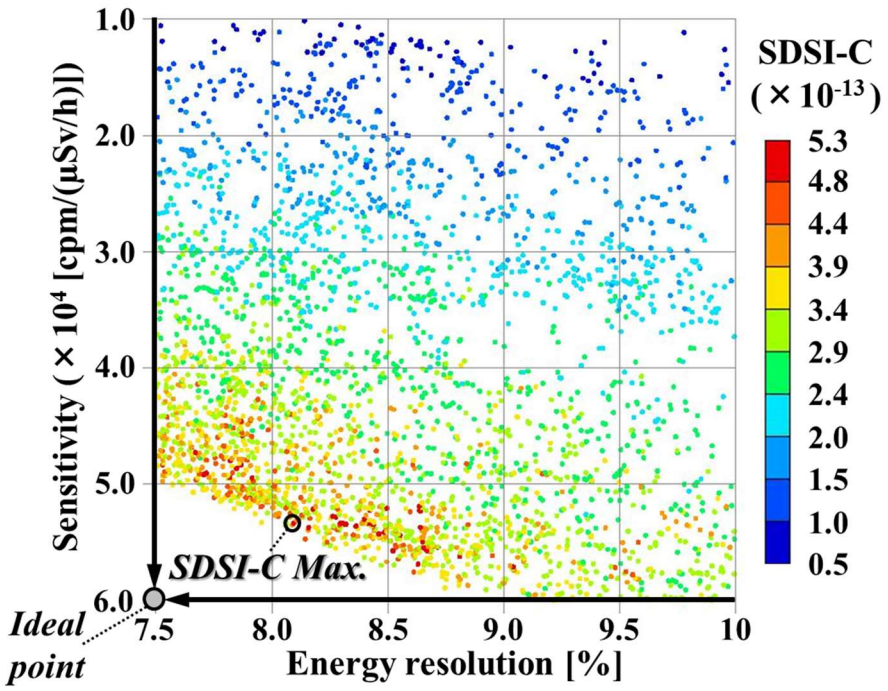


Fig. 4.48 Comparison of energy resolution and sensitivity.

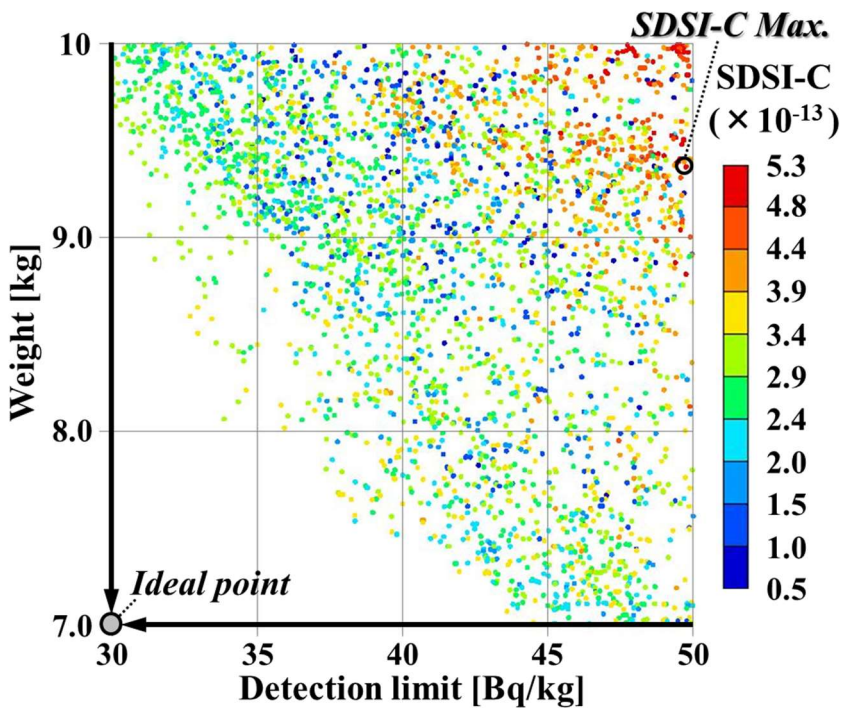


Fig. 4.49 Comparison of detection limit and weight.

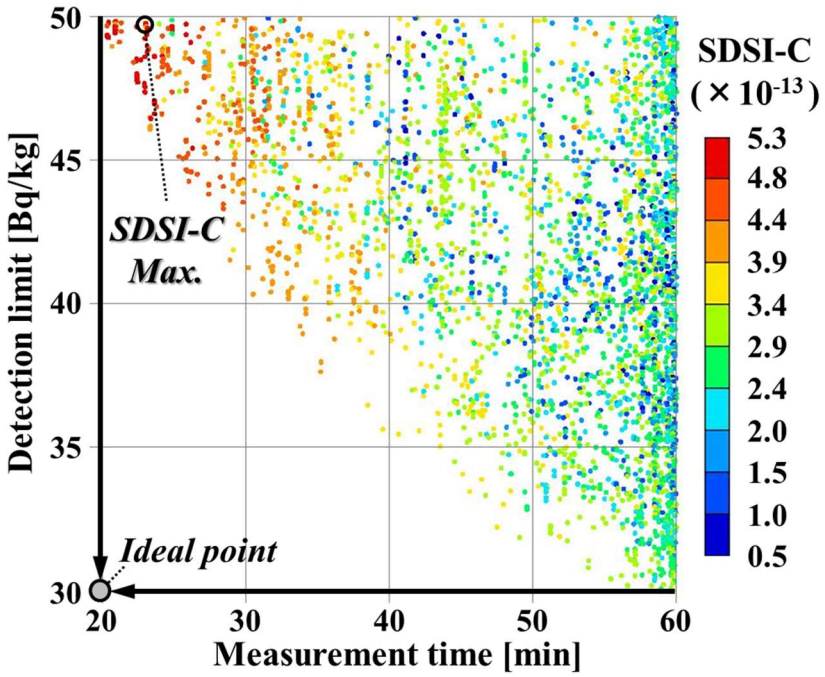


Fig. 4.50 Comparison of measurement time and detection limit.

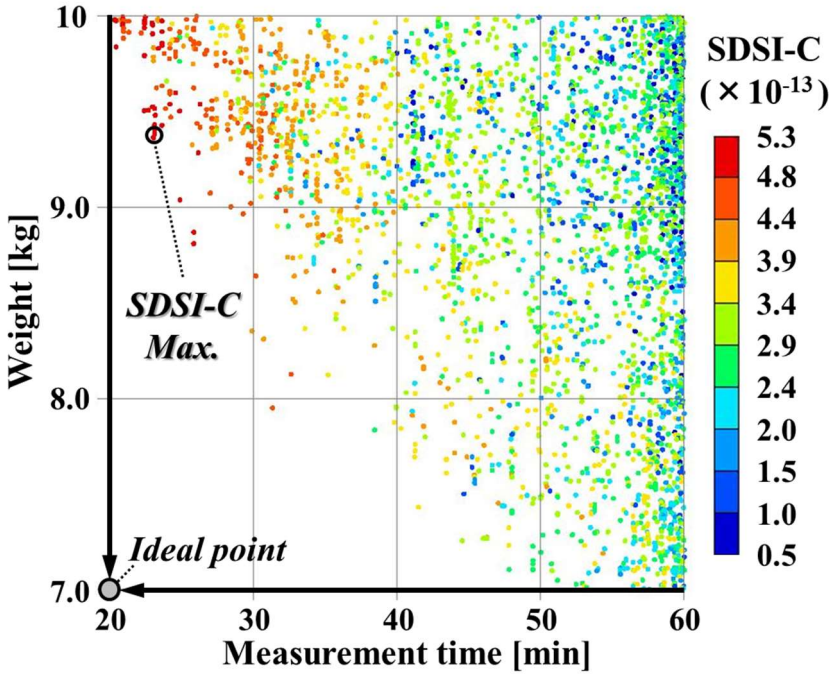


Fig. 4.51 Comparison of measurement time and weight.

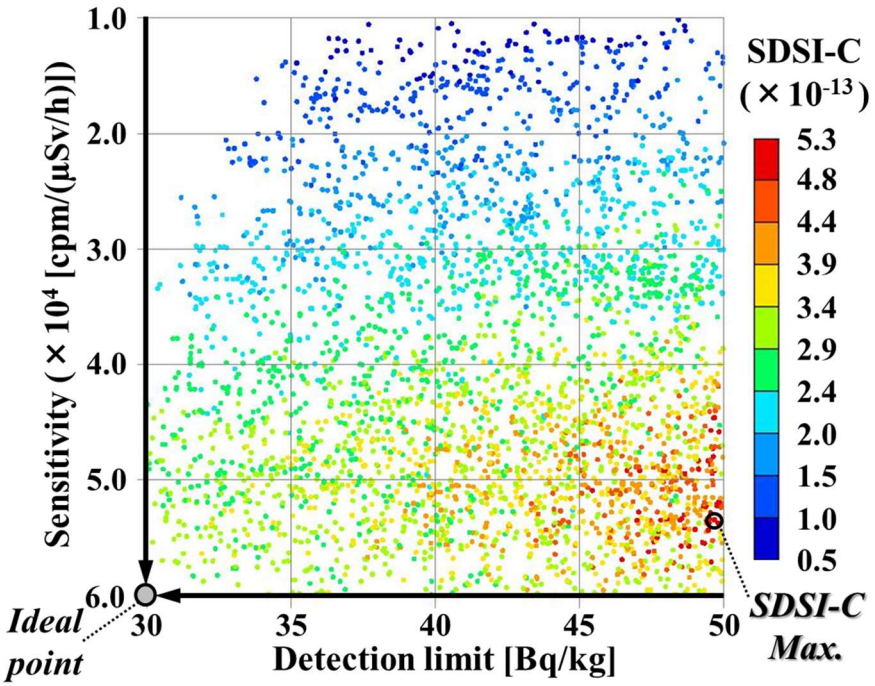


Fig. 4.52　Comparison of detection limit and sensitivity.

これらの結果に示すように、H-SRBC の適正解を導出することができた。適正解は、シンチレータ結晶のサイズが 57mm×57mm×18mm、バックグラウンド遮蔽材の厚さが 8mm、試料容器のサイズが φ120mm×35mm、計測時間が 23 分である。この時の目的関数の値は、感度が 5.0×10^{4}cpm/(μSv/h)以上、検出限界が 49Bq/kg、エネルギー分解能が 8.1%、コストが 19 万円、重量が 9.4kg、サイズが 4.8×10^{3}cm^{3} であり、全ての要求を満たしている。導出した適正解を基に詳細設計を行い、実際に制作した H-SRBC の外観写真を Fig. 4.53 に示す。

以上のように、本モデリング手法を用いて記述したモデル情報を基に、最適化設計を実行することができた。本研究では、SysML で記述したモデル情報の抽出については手動で行った。本モデリング手法に対応できるモデル情報抽出アルゴリズムの構築と自動化が今後の課題である。

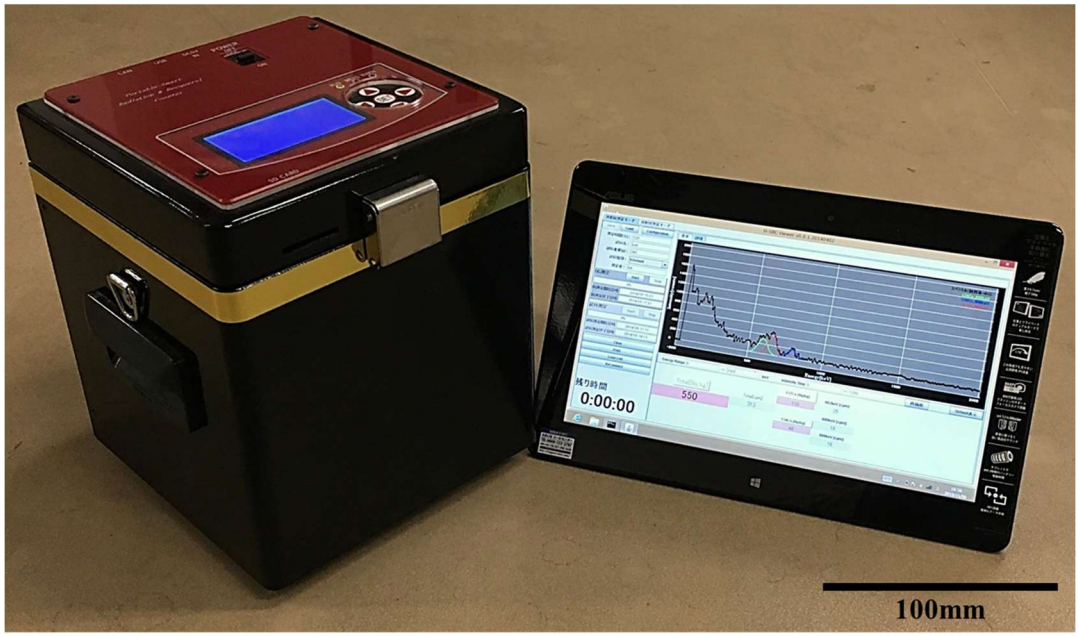


Fig. 4.53　Photograph of the radiation measurement system.

4.4.2　最適化問題変更におけるモデル再利用性の検証結果と考察

従来手法ではシステムデザインにおける一貫したモデリング手法がないため、設計情報が混在して記述され、モデルの再利用が難しいという課題があった。そこで、本モデリング手法による要求変更の際のモデルの再利用性を検証した。製品システムモデルが変更されるような大きな要求変更の場合は、全体を通して新たにモデリングしシステムデザインを行うことになる。そのため、ここでは最適化問題の変更において、製品システムモデルが再利用できるかを検証した。以下に、結果を述べる。

前述で適正解を求めた H-SRBC(Ver. 1 とする)に関して、少し異なる市場要求に応えるため、最適化問題を変更した。新たに最適化設計する H-SRBC を Ver. 2 とし、要求(目的関数)の比較を Table 4.8 に示す。主要な違いは、Ver. 1 では空間放射線量(μSv/h)、放射能濃度(Bq/kg)の両方が計測できるシステムであったのに対して、Ver. 2 では放射能濃度の計測に特化し、計測時間の短時間化と低コスト化を実現することである。

製品システムモデルの再利用性を検証するため、比較として、従来の SDSI-Cubic 手法で最適化問題の変更をモデリングした結果を Fig. 4.54 に示す。ここでは全てを示すことが難しいため、検出限界(DetectionLimit)の項目に注目した部分のみを示す。最適化問題の定義において、検出限界(DetectionLimit)に着目すると、感度や計測時間などが関わってくるた

Table 4.8　Requirement comparison of Ver. 1 and Ver. 2.

Measurement Object			Ver. 1	**Ver. 2**
Ambient dose			✓	**-**
Radioactivity concentration			✓	✓
Objective function	Unit	Criterion	Constraint condition	
Sensitivity	cpm/(μSv/h)	Max.		**Not an objective function**
Detection limit	Bq/kg	Min.	$DL \leqq 50$	$DL \leqq 50$
Energy resolution	%	Min.	$R \leqq 10$	$R \leqq 10$
Cost	yen	Min.	$C \leqq 200{,}000$	$C \leqq$ **187,000**
Weight	kg	Min.	$W \leqq 10$	$W \leqq 10$
Case size	cm^3	Min.		
Bq measurement time	min	Min.	$MT \leqq 60$	$MT \leqq$ **30**

め、これに関する全ての記述変更を行う必要がある。Fig. 4.54 の中で、灰色の円で示した部分が各変更箇所である。具体的には、短時間計測のために計測時間の最大値を 60 分から 30 分に変更が必要であり、Fig. 4.54 の(a) MeasurementTime 要素内に持つ最大値“60”という情報を特定し、Fig. 4.54 の(a’) MeasurementTime 要素内の情報を最大値“30”に変更した。また低コスト化のためにコストの最大値を 200,000 円から 187,000 円に変更が必要であり、Fig. 4.54 の(b) Cost 要素内の情報(最大値“200000”)を特定し、Fig. 4.54 の(b’)要素内の情報(最大値“187000”)のように変更した。さらに、感度は目的関数ではなくなったため、Fig. 4.54 の(c) Sensitivity という目的関数の要素は、(c’) Sensitivity という初期値をもつ一般的なパラメータの要素に変更した。

Fig. 4.54 では要素内の情報を見えやすく出しているが、これらは要素の中に格納されている情報であり、中身を調べてわかる情報である。この例でもわかるように、単純な要求変更に対しても、製品システムモデル内の各要素が持つ最適化問題の定義情報を探索、変更箇所を特定する必要がある。しかし、要素内に持つ情報は一目で理解しにくく、一つ一つ特定と変更を行うことは、非常に複雑で困難である。また最適化問題の変更で、製品システムモデルの要素や要素が持つ情報を変更するということは、製品システムモデルその

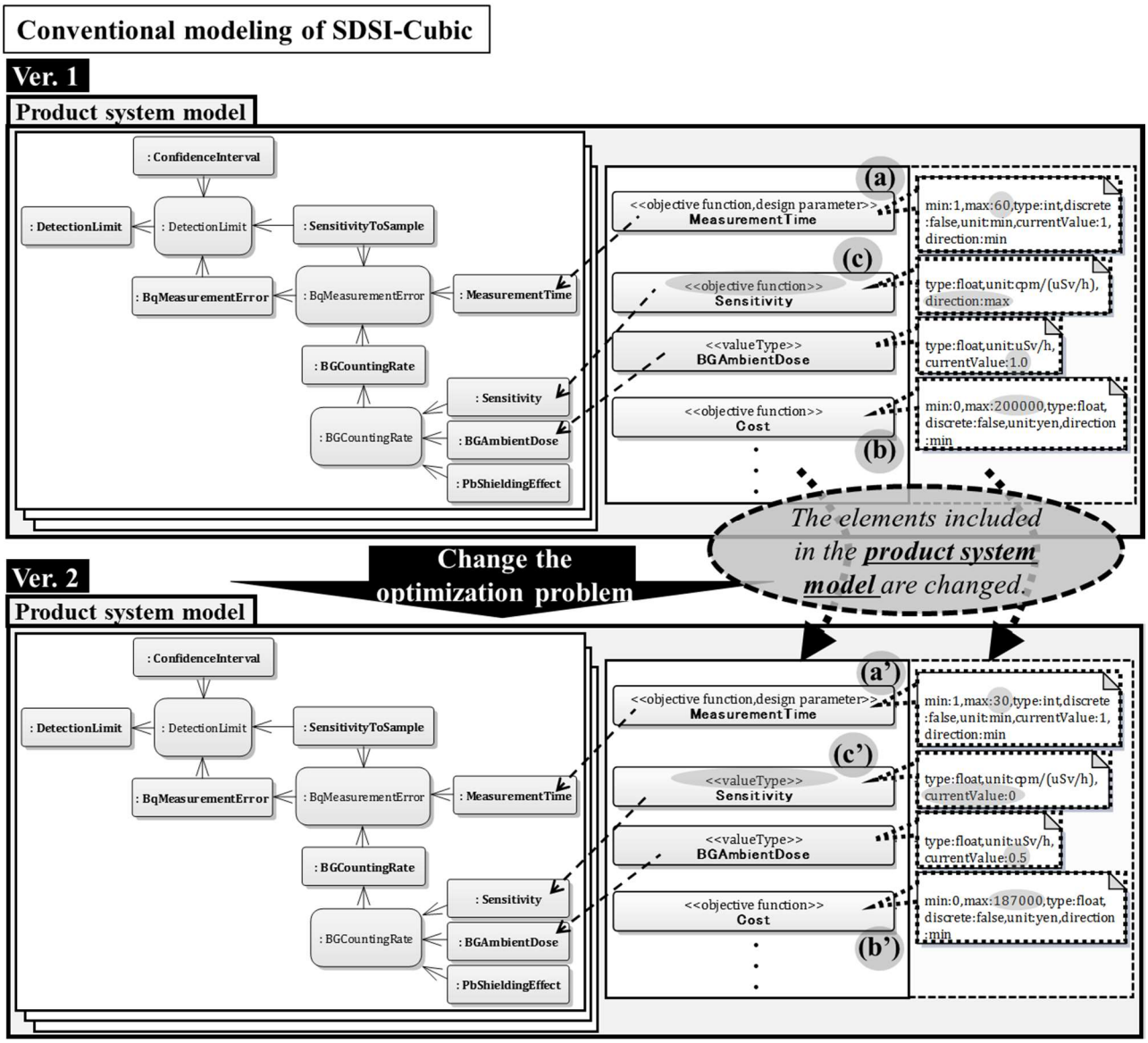


Fig. 4.54　Comparing example of the models (ver. 1/2) using a conventional modeling.

ものが変更されてしまっており再利用できていないということである。

これに対して、本モデリング手法を用いて、同じ最適化問題の変更をモデリングした結果を Fig. 4.55 に示す。Fig. 4.55 の上部 Ver. 1 のモデルは、4.3 節のモデリング結果で述べたモデルの一部である。Fig. 4.54 で示したものと同じ内容の設計変更ではあるが、製品システムモデルはそのまま同じモデルを再利用でき、設計空間固有モデルのみを変更できた。Fig. 4.55 の中で、灰色の円で示した部分が各変更箇所である。具体的には、Fig. 4.55 の(a)から(a’)、(b)から(b’)で示した箇所のように、設計空間固有モデル内の要素が持つ情報のみ

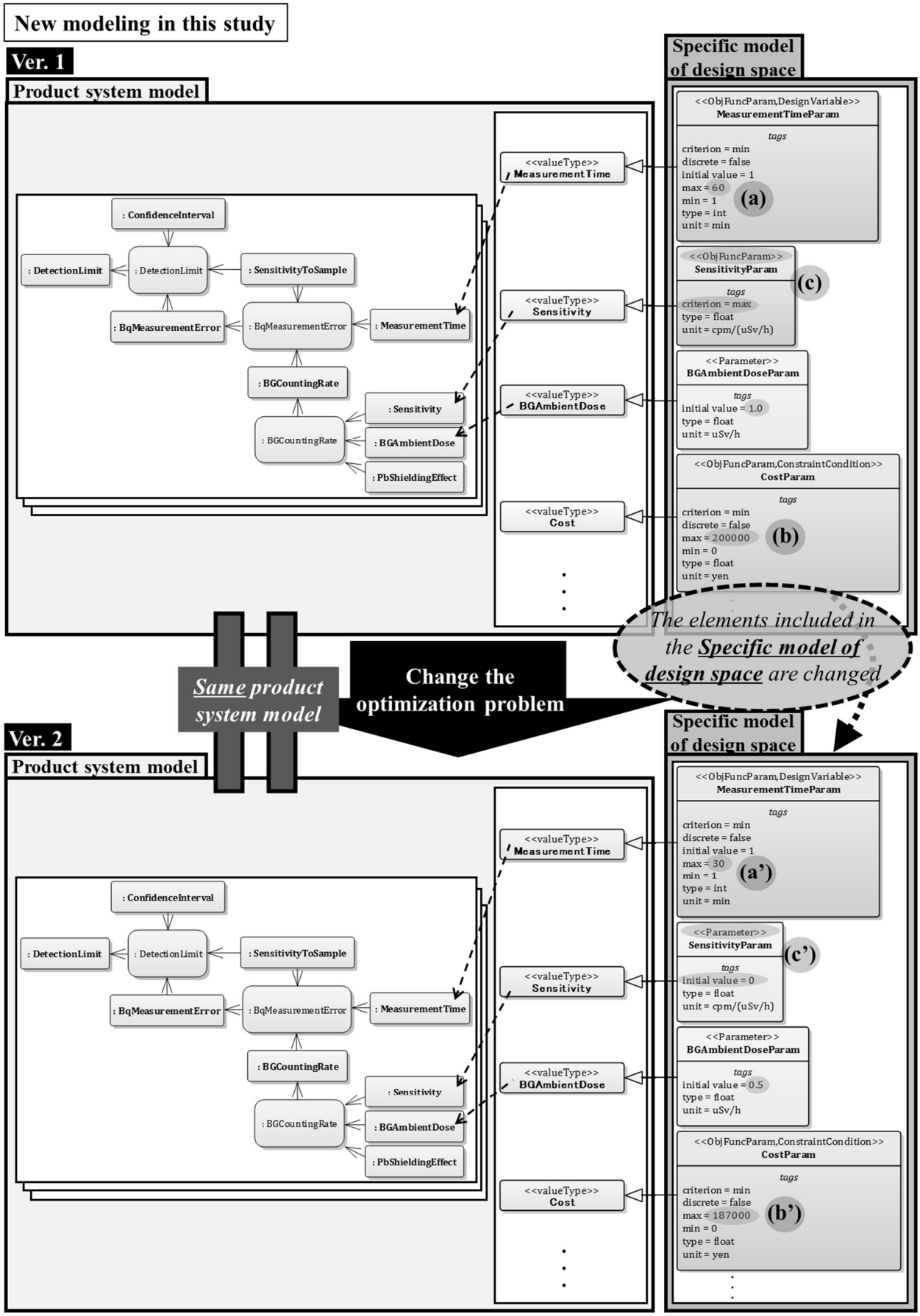


Fig. 4.55 Comparing example of the models (ver. 1/2) using new modeling in this study.

を変更できた。従来手法と比べてその情報が可視化されているため、特定と変更が容易である。また、パラメータに記述すべき項目はプロファイルで定義できているため、Fig. 4.55の(c)から(c')で示した箇所(目的関数からパラメータに要素を変更)のように、要素そのものを変更する場合も容易である。加えて、設計空間固有モデル内の要素そのものが変更されても、その要素から製品システムモデル内の要素への関連付けをし直すだけであり、製品システムモデル内の要素は変更されない。

このように、本モデリング手法を用いることで、要求変更に際して、設計空間固有モデルに記述された最適化問題の定義情報の変更箇所を、容易に特定、変更できた。つまり、設計空間固有モデルのみの変更で、製品システムモデルはそのまま再利用でき、本モデリング手法による製品システムモデルの再利用性について検証できた。

さらに、最適化問題を変更したモデリング結果を用いて最適化設計を行った結果、シンチレータ結晶のサイズが 41mm×52mm×20mm、バックグラウンド遮蔽材の厚さが 9mm、試料容器のサイズが φ120mm×32mm、計測時間が 12 分という適正解が得られた。この時の目的関数の値は、検出限界が 49Bq/kg、エネルギー分解能が 8.0%、コストが 18 万円、重量が 9.5kg、サイズが 4.7×10^3cm^3 であり、Ver. 2 への全ての要求を満たすことができる。

以上のように、本モデリング手法による、要求(最適化問題)変更における製品システムモデルの再利用性について検証できた。従来の SDSI-Cubic 手法のモデリングでは製品システムモデルを再利用できないのに対して、本モデリング手法では製品システムモデルを完全に再利用でき、モデルの再利用性が向上した。これは、製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルを独立かつ関連付けて記述できているためである。今回のような最適化問題の変更だけではなく、設計ツールの変更など、該当するモデル内の情報を変更するだけの場合は、他のモデルを変更することなく同様に各モデルの再利用が可能である。つまり本モデリング手法により、設計変更に合わせて各モデルを再利用でき、モデルの再利用性を向上することができた。

4.4.3　詳細設計(G(E)関数導出)の結果と考察

ここでは応用展開として、前述の H-SRBC のモデリング結果を基に、シンチレータ結晶の材料を変更、詳細設計へと実体情報を受け渡し、詳細設計である G(E)関数導出を行った結果を述べる。

まず、H-SRBC のシステムデザインにおいてモデリングした設計空間固有モデル、および設計ツール固有モデルを変更した。ここでの設計変更は、継続した空間放射線量モニタリングおよびエネルギー核種判別を高精度に行うための、シンチレータ結晶の形状、材料の変更である。空間放射線量モニタリングを行うために、あらゆる方向からの放射線を同等の効率で検出するために、放射線の入射方向に対する方向依存性を小さくする円柱形を採用することにした。最も方向依存性が小さいのは球形であるが、結晶の加工および光検出デバイスの実装が難しいことから、本研究では円柱形とした。材料は、エネルギー分解能をできるだけ向上させるため、高感度化のための大体積化ができるシンチレータ結晶の中で最もエネルギー分解能の高い材料の 1 つである、SrI_2(Eu)シンチレータ結晶 [13, 14]を用いることとした。それらの情報を設計空間固有モデル、設計ツール固有モデルに記述した結果の一部を、Fig. 4.56 に示す。Fig. 4.56 に示すように、製品システムモデルに記述されている固体シンチレータの具体的な構造として、設計空間固有モデルに円柱形 SrI_2(Eu)結晶と記述し、さらに設計ツール固有モデルで CAD(Geant4)で円柱形を表現するのに必要な情報を記述している。ここでは、円柱形を記述するためのステレオタイプを用いて記述している。同様に、SrI_2(Eu)の材料情報についても記述した。これらのモデル情報を基に、Geant4 で 3 次元 CAD モデルを構築し、詳細設計へと受け渡した。

次に、3 次元 CAD モデルを用いて、放射線計測システムの詳細設計の 1 つである G(E)関数導出を行った。G(E)関数とは、放射線計測システムが計測したエネルギースペクトルを基に、放射線が人体に与える影響度合い線量(Sv)値を各エネルギーの特性を考慮し算出するための関数である [15]。簡易的な方式の場合、放射線計測システムが計測した計数率から、標準線源 ^{137}Cs で校正した線量変換係数を用いて、空間放射線量を導出している。しかしこの方式の場合、全ての放射線が持つエネルギーを標準線源 ^{137}Cs の放出エネルギー(662keV)と仮定した値になってしまう。実際には様々なエネルギーを持つ放射線が人体に影響を与えているため、より高精度な計測を行うためには、Table 4.9 に示すように、各エネルギーによって人体に与える影響が異なることを考慮する必要がある。そこで、放射線計測システムの詳細設計の 1 つとして、その性能を担保するための G(E)関数の導出が行われている [15]。

G(E)関数を導出するためには、放射線計測システムが持つ、各エネルギーに対してどのように応答しエネルギースペクトルとして出力するか、その特性を求める必要がある。しかし、その応答特性を求めるためには、様々な入射エネルギーを持つ標準線源が必要であ

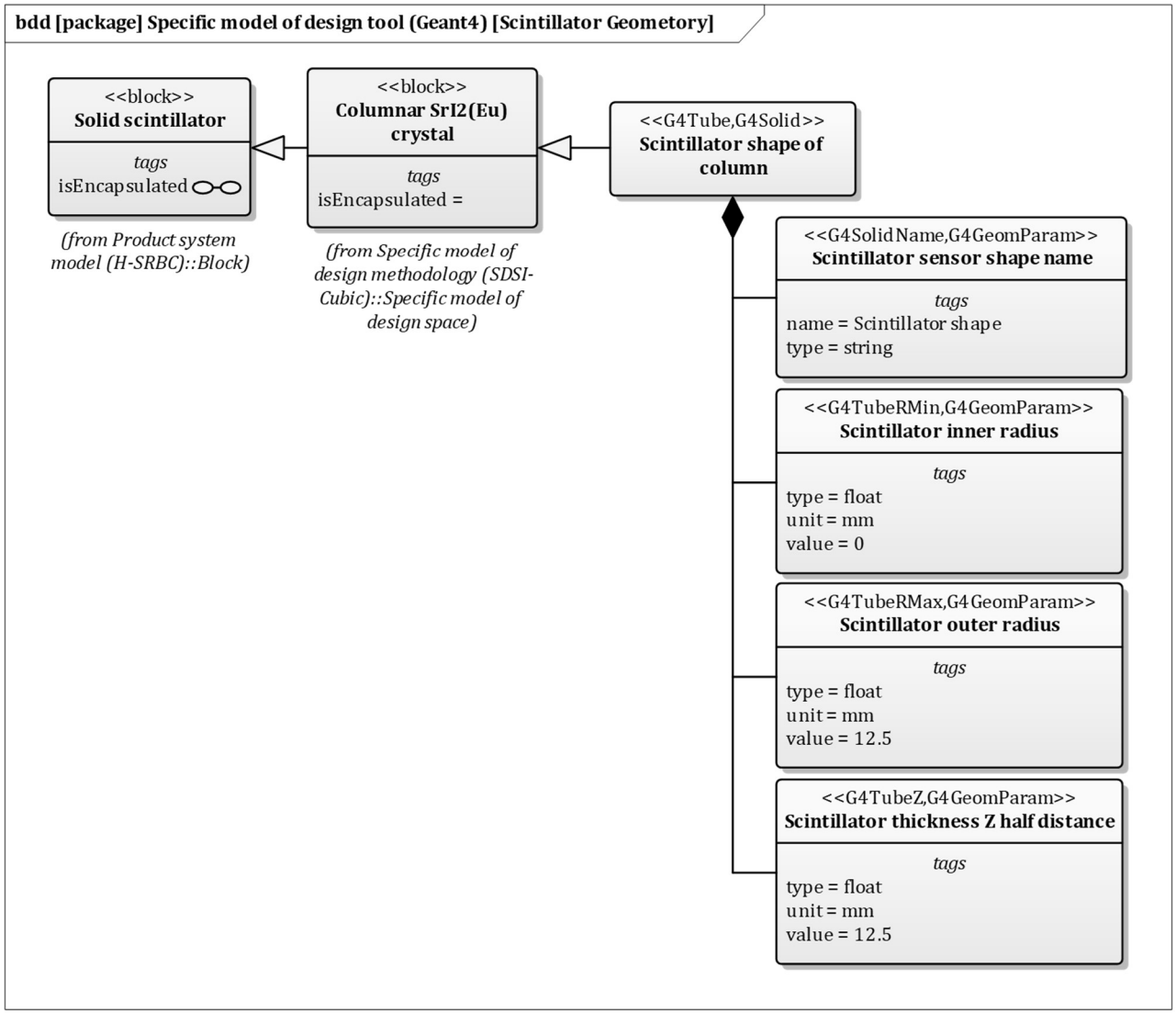


Fig. 4.56　Description result in specific model of design tool.

り、その実験は非常に困難なものである。そこで、応答特性はコンピュータ上でシミュレートし導出する手法が用いられている。放射線計測システムが持つ応答特性は、形状や材料といった実体によって決まるものであり、実体情報は不可欠である。

そこで、前述で構築した 3 次元 CAD モデルを用いて、シミュレーションを行う。シミュレーションの様子を、Fig. 4.57 に示す。Fig. 4.57 において、中心の円柱状の物体が設計ツール固有モデルの情報から構築した 3 次元 CAD モデルであり、その他の緑や赤の線がモンテカルロシミュレーションを行った各放射線の軌跡の様子である。

Table 4.9　Relationship between photon energy and radiation dose[16].

Photon energy (Mev)	H*(10)/Φ (pSv cm2)
0.01	0.061
0.015	0.83
0.02	1.05
0.03	0.81
0.04	0.64
0.05	0.55
0.06	0.51
0.08	0.53
0.1	0.61
0.15	0.89
0.2	1.2
0.3	1.8
0.4	2.38
0.5	2.93
0.6	3.44
0.8	4.38
1	5.2
1.5	6.9
2	8.6
3	11.1
4	13.4
5	15.5
6	17.6
8	21.6
10	25.6

シミュレーションは、φ25mm×25mm の SrI_2(Eu)シンチレータ結晶に対して、γ 線平行フラックスを照射した場合の、結晶内におけるエネルギー付与をシミュレートする。結晶内での相互作用は、γ 線に対する光電効果、コンプトン散乱、電子対生成、電子・陽電子に対するクーロン散乱、電離、制動放射、対消滅といった標準的な電磁相互作用を考慮する。照射エネルギーは Table 4.9 のエネルギーとし、照射数は各エネルギーについて 100 万発とした。シミュレーションツールは、Geant4 のシミュレーション機能を実装したプログラムを用いた。シミュレーションにより求めた応答特性の結果を Fig. 4.58 に示す。また、求めた応答特性と各エネルギーによる線量値から、最小二乗法により G(E)関数を導出した。その結果を、Fig. 4.59 に示す。

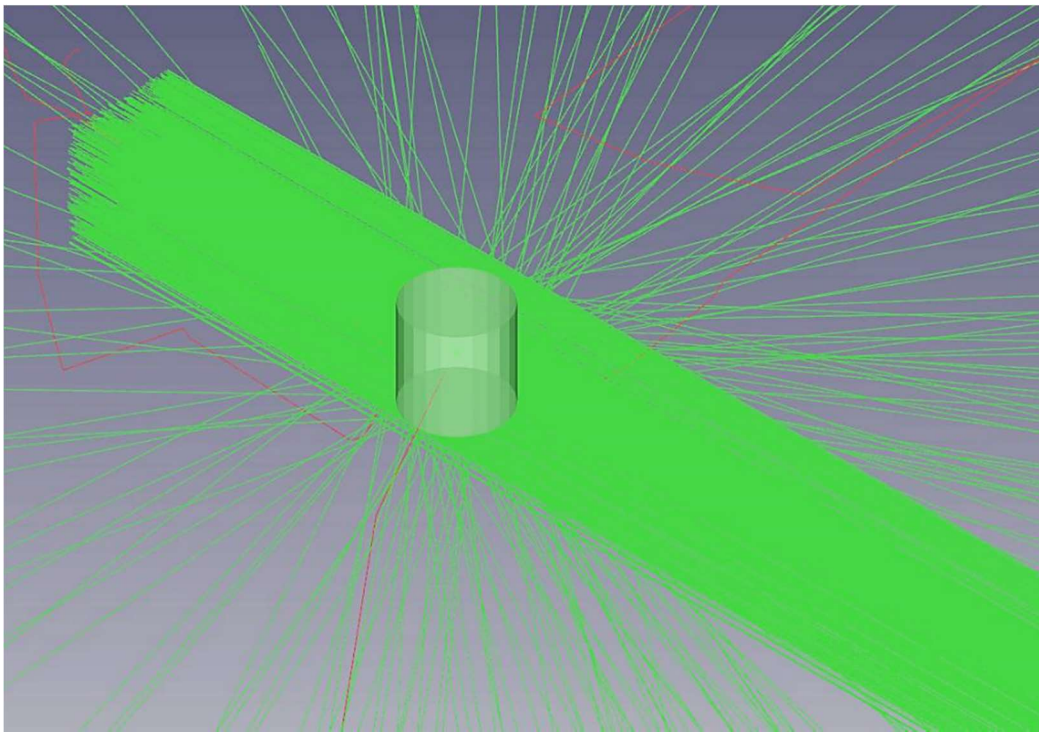


Fig. 4.57 Appearance of gamma ray simulation.

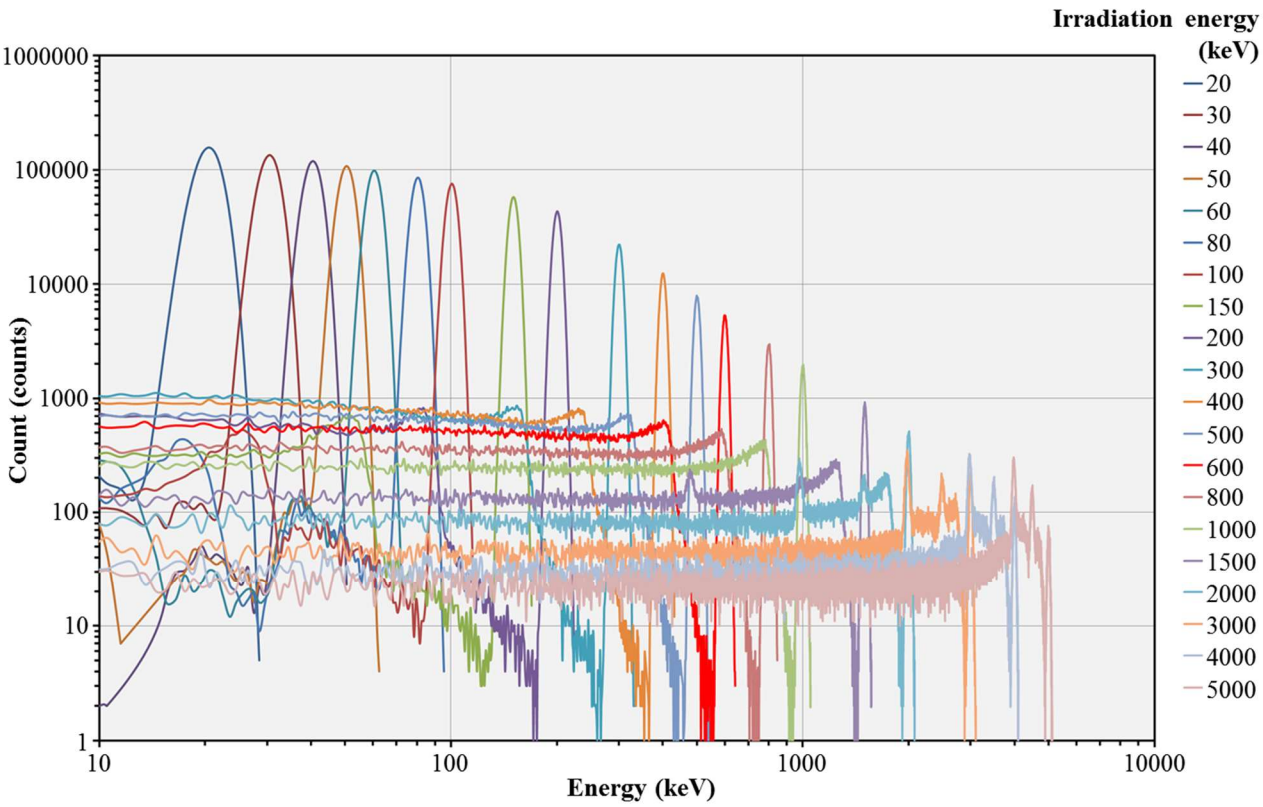


Fig. 4.58 Response spectrum result.

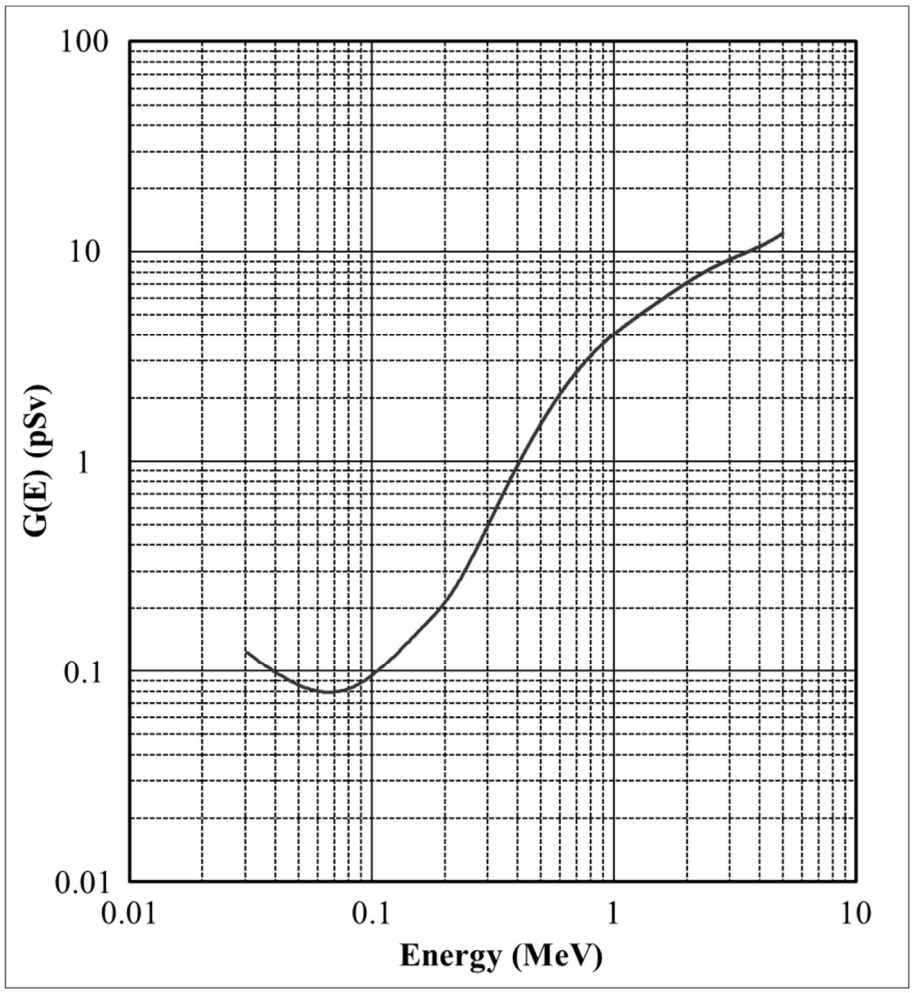


Fig. 4.59　Result of derived G(E) function.

Fig. 4.60 に示す制作した放射線計測システムによる計測で得られたエネルギースペクトルに対して、導出した G(E)関数を用いて線量率を算出した。その結果、校正場の 2.00μSv/h に対して、計算値で 1.92μSv/h を得ることができ、校正場の誤差も考慮すると、G(E)関数による線量率の算出が可能であることを確認した。

以上のように、概念設計、基本設計、および詳細設計に繋がるシステムデザインのプロセスにおいて、実体情報も含めたモデルを記述することで、詳細設計へとモデルとして設計情報を受け渡し、繋げることが可能であることを確認できた。

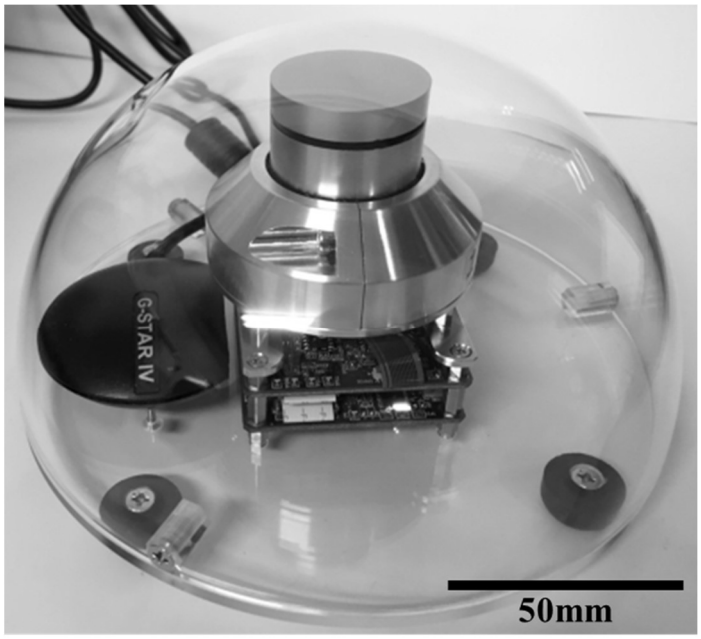


Fig. 4.60　Photograph of the radiation measurement module.

4.5　考察

本章では、構築したモデリング手法を用いて、放射線計測システムのモデリングを行った。身の回りの安心、安全を確認できるような、可搬型で放射線量および放射能濃度の計測が可能な、高コストパフォーマンス放射線計測システムが求められている。しかし、放射線計測システムは、ハードウェア、ソフトウェアからなる複雑な製品システムであり、特にシステムデザインにおいて性能の支配因子である実体の考慮が不可欠であったため、本モデリング手法を適用し、システムデザインプロセスにおける一貫したモデルを構築した。

具体的には、製品システムモデルでは、要求を記述し、その要求を満たす理想システム構成としてシンチレーションカウンタ方式を選択し、その構成を記述できた。また各システム構成要素が、どのよう要求を満たすべきか、その要求との関係を記述できた。また、理想システム構成に関わる検出限界やコスト式といった制約関係を記述することができた。設計空間固有モデルでは、形状や材料、部品選択などを決めるためのより具体的な要求を記述でき、その要求に対応する具体的なシステム構造を記述できた。また具体的なシステム構造を検討することで、形状や材料などに依存する感度式などの制約関係を記述するこ

とができた。その後、SDSI-Cubic 手法による適正なシステム構造を導出するためのパラメータの情報や最適化問題を記述することができた。ツール連携アルゴリズム固有モデルでは、SDSI-Cubic 手法の機能と設計ツールの関係を記述することができた。設計ツール固有モデルは、形状や材料といった実体情報をシステムレベルで記述でき、設計ツールと連携するための情報を記述することができた。

応用展開では、SDSI-Cubic 手法による最適化設計を行い、適正解を導出することができた。モデルの再利用性については、最適化問題の変更を例に確認することができた。また、システムレベルでの実体情報のモデルを詳細設計へと受け渡し、詳細設計の 1 つである G(E)関数導出を行うことができた。

以上のように、システムデザインのプロセスにおいて、一貫したモデルを記述することができ、本モデリング手法を適用することができた。

4.6 結言

構築したモデリング手法を用いて、ハードウェア、ソフトウェアからなる複雑な製品システムであり、特にシステムデザインにおいて性能の支配因子である実体の考慮が不可欠である放射線計測システムのシステムデザインに適用し、モデリングと応用展開を行った。以下に、結論を述べる。

1. 本モデリング手法の適用により、4 つのモデル(製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズムモデル、設計ツール固有モデル)とそれぞれのモデルが紐付いた一貫したモデルとして記述された。各モデルは、要求、機能、構造、制約関係の定義を含む放射線計測システムの製品システムモデル、要求、構造、制約関係、最適化問題の定義を含む設計空間固有モデル、ツール選択、フローの定義を含むツール連携アルゴリズムモデル、CAD(Geant4)用の構造、制約関係の定義を含む設計ツール固有モデルである。
2. 記述されたモデル情報を基に、SDSI-Cubic 手法が実行され、適正解が導出された。要求を満たす放射線計測システムの適正設計解は、シンチレータ結晶のサイズが 57mm×57mm×18mm、バックグラウンド遮蔽材の厚さが 8mm、試料容器のサイズが φ120mm×35mm、計測時間が 23 分である。
3. 最適化問題の変更を例に、モデルの再利用性が確認された。また、設計情報を再利用しながら形状や材料を変更した放射線計測システムのシステムデザインが行われ、

システムレベルで記述された形状や配置といった実体情報が詳細設計に受け渡されることで、詳細設計の 1 つである G(E)関数の導出が可能であった。

4. このように、放射線計測システムに対して、一貫したモデルベースでシステムデザインが可能であったので、さらに様々な放射線計測システムへの展開が期待できる。

以上、放射線計測システムに適用し、本モデリング手法の検証を行うことができた。

参考文献

1) 一般社団法人日本原子力産業協会，“世界の原子力発電開発の動向”，一般社団法人日本原子力産業協会，(2016).
2) 大西武雄，長岡俊治，“宇宙放射線の生物影響研究の重要性”，宇宙生物科学，Vol. 12，No. 1 (1998) 5-13.
3) 加藤貞幸，“新物理学シリーズ 26，放射線計測”，培風館，(1994).
4) William J.Price，“放射線計測”，コロナ社，(1971).
5) 飯田修一，大野和郎，神前熙，熊谷寛夫，沢田正三，“物理測定技術第 6 巻，放射線測定”，朝倉書店，(1967).
6) 石榑顕吉，舘野之男，富永洋，中澤正治，山口彦之，“放射線応用技術ハンドブック”，朝倉書店，(1990).
7) 三枝健二，入船寅二，福士政広，齋藤秀敏，中谷儀一郎，“放射線基礎計測学”，医療科学社，(2001).
8) 菊池正典，“半導体のすべて”，日本実業出版，(1998).
9) 放射線技術用語辞典編集委員会，“放射線技術用語辞典”，日本理工出版会，(1994).
10) D. H. Wilkinson，“Ionization Chambers and Counters”, Cambridge University Press London, (1950).
11) E. W. Emery，“Geiger-Mueller and Proportional Counters”, Academic Press New York, (1966).
12) D. H. Wilkinson，“The Geiger discharge revisited Part 2. Propagation”，Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A，Vol. 383，(1996) 516-522.
13) Shiro Sakuragi，Satoshi Hashimoto，“Preparation of SrI_2(Eu) Scintillation Crystals by the “Liquinert” Process and their Scintillation Properties”，Proceedings of the 28th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses，(2015) 16-22.
14) P. R. Beck，N. J. Cherepy，S. A. Payne，E. L. Swanberg，K. E. Nelson，P. A. Thelin，S. E. Fisher，S. Hunter，B. M. Wihl，K. S. Shah，R. Hawrami，A. Burger，L. A. Boatner，M. Momayezi，K. T. Stevens，M. H. Randles，D. Solodovnikov，“Strontium Iodide Instrument Development for Gamma Spectroscopy and Radioisotope Identification”，Proceedings of the SPIE (The International Society for Optics and Photonics)，Vol. 9213，(2014).
15) 森内茂，“JAERI 1209：スペクトル - 線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定”，日本原子力研究所，(1971).

16) ICRP (International Commission on Radiological Protection), "ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", Annals of the ICRP, Vol. 26, No. 3-4 (1996).

第 5 章　結言

製品システムデザインにおいて、概念設計、基本設計、および各詳細設計へと繋がる一貫した設計プロセスを支援するモデリング手法が構築されておらず、特に形状や配置といった実体情報が要求から繋がる形でモデリングできていないという課題があった。そこで本研究では、それらの課題を解決するため、概念設計、基本設計、および詳細設計へと一貫した情報として繋がるモデリングの概念とその記述方法を合わせたモデリング手法を構築し、放射線計測システムのシステムデザインへの適用とモデリング手法の検証を行った。本章では、結言として、各章をまとめ、本論文の最終的な結論を述べる。

まず第 1 章では、製品システムのシステムデザインにおける従来のモデリング手法の課題を明らかにした。モデリング手法はモデリング概念とモデル記述方法を合わせたものであり、従来のモデリング概念では概念設計、基本設計から詳細設計へと繋がる一貫したモデリング概念が構築されていないこと、従来のモデル記述方法でも基本設計および詳細設計へと繋がる一貫した汎用的なモデル記述方法としては構築されていないことが課題であった。特に、形状や配置といった実体情報がシステムデザインプロセスの中でモデリングされておらず、ハードウェアの詳細設計に繋げることができないという課題があった。それに対し、概念設計、基本設計、さらには各詳細設計ドメインへの橋渡しとなるシステムデザインにおいて、一貫してモデルベースで行うことができるように、どのような情報をどのような観点で捉えモデリングすればよいのか、そのモデリング概念と、それを表現するためのモデル記述方法を合わせたモデリング手法の構築が必要であるという結論を得た。

第 2 章では、第 1 章の課題を受け、一貫したモデルベースのシステムデザインを実現するモデリング手法を構築するために、モデリング概念を構築した。具体的には、基本設計および詳細設計に繋がる部分に関し、モデリング概念が構築されていないという課題に対して、マルチドメインに関するデザインという観点に着目し、単一設計ドメインからマルチドメインに展開、システム的な観点で整理することで、モデリングに必要な情報を抽出、整理した。その結果から、製品システムに関する情報、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報、各設計ツールに関する情報という 4 つの観点とそれらの関係で情報を捉えるモデリング概念を構築した。構築したモデリング概念は、従来技術のモデリング概念を包含しており、かつ、新たな観点を加えることで、一貫したモデルベースのシステムデザインを支援するものである。

第 3 章では、第 2 章で構築したモデリング概念を基に、モデル記述方法を構築した。具

体的には、まず従来のモデル記述方法を整理し、本研究で目指すモデル記述方法は SysML をベースに構築を行うこととした。そして、製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの 4 つのモデルを SysML を拡張して記述し、それらを紐づけることで一貫してモデルベースのシステムデザインが可能なモデル記述方法を構築した。さらに、形状や配置といった実体情報については、パラメトリックに形状、配置を扱える CAD(Geant4)を用いて、システムレベルでの実体情報のモデリングを可能とした。以上、第 2 章、第 3 章の検討により、モデリング概念とモデル記述方法を合わせた、モデリング手法を構築することができた。

第 4 章では、構築したモデリング手法を用いて、ハードウェア、ソフトウェアからなる複雑な製品システムであり、特にシステムデザインにおいて性能の支配因子である実体の考慮が不可欠である放射線計測システムのシステムデザインに適用し、モデリングと応用展開を行った。その結果、概念設計、基本設計、さらには詳細設計へと繋がる一貫したモデルを記述することが可能であることを検証できた。また、最適化設計による適正解の導出、要求変更(設計変更)に伴うモデルの再利用性も検証できた。実体情報についても要求から繋がる形でモデルを記述することが可能であることを検証できた。

以上より、本研究の最終的な結論を以下に述べる。

1. 製品システムのシステムデザインにおける従来のモデリング手法の課題は、概念設計、基本設計、および各詳細設計へと繋がる一貫したモデリング概念およびモデル記述方法が構築されていないことであった。特に、形状や配置といった実体情報がシステムデザインプロセスの中でモデリングされておらず、ハードウェアの詳細設計に繋げることができないという課題があった。
2. 上記の課題を解決すべく、マルチドメインに関するデザインという観点に着目し、単一設計ドメインからマルチドメインに展開、システム的な観点で整理することで、モデリングに必要な情報が抽出、整理され、製品システムに関する情報、設計空間に関する情報、ツール連携アルゴリズムに関する情報、各設計ツールに関する情報という 4 つの観点とそれらの関係で情報を捉えるモデリング概念が構築された。
3. 構築されたモデリング概念を基に、製品システムモデル、設計空間固有モデル、ツール連携アルゴリズム固有モデル、設計ツール固有モデルの 4 つのモデルを SysML を拡張して記述し、それらを紐づけることで一貫してモデルベースのシステムデザインが可能なモデル記述方法が構築された。さらに、パラメトリックに形状、配置を扱

える CAD(Geant4)を用いることで、システムレベルでの実体情報のモデリングが可能となった。

4. 構築されたモデリング手法を放射線計測システムのシステムデザインに適用した結果、概念設計、基本設計、さらには詳細設計へと繋がる一貫したモデルが記述可能であることが検証された。そして、最適化設計、モデルの再利用性確保、詳細設計への展開が可能なモデリング手法であることが検証された。

このように、本研究では、概念設計、基本設計、および詳細設計へと一貫して繋げるモデルベースのシステムデザインが実現できていないという課題に対し、モデリング概念の構築とモデル記述方法の構築を行い、一貫した設計プロセスのためのモデリング手法を構築できた。また、放射線計測システムのシステムデザインにおけるモデリングと応用展開を行うことができた。

現在、“モデルベース”という考え方は、製造業など様々な分野に浸透してきており、その取り組みが進んでいる。しかしながら、モデルベースシステムズエンジニアリングやモデルベースシステムデザインといった部門や会社を跨ぐような横断的な取り組みは、思うように推進するのが難しいという現実もある。ステークホルダや企業方針によるところも大いにあるが、いざモデルベースでの仕事の仕組み作りを進めようとした際に、どのように進めればよいか、という指針が明確なっていないというのも一つの大きな要因である。特に製品システムの設計においては、現場の設計者が使いやすく、創造性が発揮できる仕組みが必要である。

システムズエンジニアリングのプロセス標準は概略的であり、そのまま適用するのは難しい。またモデルの記述方法があっても、道具があるだけであり、その道具をどのように使うかというのは、その都度考えなくてはならない。つまり、概略のプロセスに沿って、具体的にモデルベースを進める手順があり、それを実行する道具が揃って初めて、モデルベースでの仕事の仕組みを検討することができる。

本研究は、その一助となるべく研究を進めたものであり、基本的な考え方となるモデリング手法を構築することができた。今後、製品システムが益々大規模化、複雑化していく中で、現在よりもさらに効率的で高付加価値を生むシステムデザインが求められていく。そして、モデルベースのシステムデザインを行う仕組み作りはさらに加速して進められる。その中で、本研究で得られた知見は、その支援をすることができ、ひいては社会を豊かにするより良いものづくりに寄与できるものである。

謝辞

本研究は、大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 荒井栄司教授の懇切丁寧なご指導、ご助言により遂行し得たものである。ここに厚く御礼申し上げます。他研究室の学生でありながら、本論文の主査を快く引き受けてくださり、そして多くの時間を割いてご指導頂きました。また、一年長くかかってしまいましたが、その間も引き続きご指導頂き、最後まで遂行することができました。討論の際に頂いたご助言を実践しながら、信頼される仕事をし、社会に貢献していきたいと存じます。ご指導頂き、誠にありがとうございました。

大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 岩田剛治准教授には、本研究を進めるにあたり多大なご教示を賜りました。また研究室生活の中で、多くの討論をさせて頂き、丁寧に粘り強く、そして本質的理解が得られるまで討論する研究者としての姿勢を学ばせて頂きました。その経験を糧に、今後も精進していきたいと存じます。ご指導頂き、誠にありがとうございました。

大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 望月正人教授には、副査をお引き受け頂き、本論文への貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また討論の際には、研究者として、社会人として、今後の糧になるご教示、ご助言も頂きました。ご指導頂き、誠にありがとうございました。

山口大学大学院 技術経営研究科 岡本和也教授には、副査をお引き受け頂き、本論文への貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また、研究討論や学会発表などにおいては、グローバルな視点、企業的な視点で多くのことをご教示頂きました。それらのご指導、ご助言は、就職しても大変役立っております。ご指導頂き、誠にありがとうございました。

大阪大学共創機構 産学共創本部 佐藤了平特任教授には、研究室生活を通して、ご指導、ご鞭撻を賜り、本研究を遂行することができました。ここに厚く御礼申し上げます。研究者としての第一歩は、佐藤特任教授との出会いからでした。研究室選択、進学、就職活動など多くの岐路で、ご助言を頂きました。本研究を進める上で、多くの有益なご意見を頂いたことはもちろんのこと、様々な会議やプロジェクトを経験させて頂き、研究者、そしてリーダーとしての心構えや姿勢など、数えきれない事柄を学ばせて頂きました。学生生活は長い人生に比べると非常に短い期間ではありますが、その中で密にご指導頂けたことは、一生の財産であり、人生の本質になると確信しております。ご指導頂き、誠にありが

とうございました。

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 村田秀則助教には、研究室生活を通して、ご助言、ご援助を賜り、本研究を遂行することができました。ここに厚く御礼申し上げます。研究者として、先輩として、研究への姿勢やリーダーシップなど、多岐にわたってご教示頂きました。心より御礼申し上げます。

大阪大学 志水隆一名誉教授には、プロジェクトなどを通して、先行研究に敬意を示し、さらなる本質を追い求める研究者としての真の姿勢を学ばせて頂きました。特に、一研究者として対等に討論し研究させて頂けたことが、印象深く心に残っております。心より御礼申し上げます。

大阪大学大学院 工学研究科 生命先端工学専攻 木村吉秀准教授には、プロジェクトを通して、懇切丁寧なご指導、ご助言を賜り、本研究を遂行することができました。また、研究開発における、創造・発想の現場を経験させて頂き、多くのことを学ばせて頂きました。心より御礼申し上げます。

三重大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 永井滋一助教には、プロジェクトを通して、懇切丁寧なご指導、ご助言を賜り、本研究を遂行することができました。また、実験を含む研究開発を共に経験させて頂き、多くのことを学ばせて頂きました。心より御礼申し上げます。

大阪大学共創機構 産学共創本部 渥美幸一郎特任教授には、研究室生活の中で、多くのご指導を頂きました。また、細やかなご配慮、ご助言を頂くことや、ご相談に乗って頂くこともあり、色々な場面でご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 森永英二助教には、177 委員会などの様々な場面で、ご指導、ご助言を頂きましたこと、心より御礼申し上げます。

株式会社グローバルアシスト 坂本武志様には、本研究を遂行するにあたり、多くのご教示を頂き、また多岐にわたる技術的なご支援を頂きました。時には厳しく、時には同じ目線でご意見、ご助言を頂き、討論させて頂けましたこと、心より御礼申し上げます。

株式会社新日本電工 遊免秀二様、大久保茂夫様、日野剛健様(当時)には、本研究を遂行するにあたり、有益なご助言、ご尽力を頂きました。特に、放射線計測システムの製品化においては、多くの技術的なご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

株式会社 I.S.C.Lab. 今川恭四郎様、保田賢輔様には、本研究を遂行するにあたり、有益なご助言、ご尽力を頂きました。特に、放射線計測システムのシンチレータ開発において

は、多くの技術的なご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

株式会社千代田テクノルの皆様には、本研究を遂行するにあたり、有益なご助言、ご尽力を頂きました。特に、放射線計測システムの校正においては、多くの技術的なご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

浜松ホトニクス株式会社 大須賀慎二様、保高寿也様には、本研究を遂行するにあたり、有益なご助言、ご尽力を頂きました。特に、Geant4 や G(E)関数に関して、多くの技術的なご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、日本学術振興会 177 委員会の皆様、株式会社 CLOUDOH 吉井淳治様、株式会社スカイテクノロジー 池田練造様、ユニオンマテリアル株式会社 櫻木史郎様、福島県旅館・ホテル衛生同業組合の皆様を始めとする多くの方々に多大なご援助を賜りましたことを、心より御礼申し上げます。

本研究の一部は、科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業の助成を受けて行ったものであり、関係者の方々に深く御礼申し上げます。

大阪大学共創機構 産学共創本部 片野公也特任研究員には、日々の研究室生活の中で、多くのご助言、ご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。

米田聖人様(現 旭硝子株式会社)には、日々の研究室生活の中で、多くのご助言、ご支援を頂きました。また先輩として、多くのことを学ばせて頂きました。心より御礼申し上げます。

日々の研究室生活を送る上で、研究室の関係者の皆様、卒業された研究室の先輩、同輩、後輩の皆様には、多大なご援助を賜りましたことを、心より御礼申し上げます。

最後に、ここまで学生生活を送ることができたのは、ひとえに両親、家族の厚いご支援、ご協力によるもので、感謝してもしきれません。地元を離れての大学進学、博士前期・後期課程の進学に際し、私自身の決断を尊重し、9 年間もの長い学生生活を支え、応援し続けてくれました。1 年長くかかってしまいましたが、本論文をもって、一つの親孝行となれば幸いです。これまで、無償で支援し、見守り、応援してくれた尊敬する両親に、そして傍で支え続けてくれた最愛の妻に、最大限の敬意と謝意と愛情を表し、謝辞とさせて頂きます。

付録 A　放射線計測システムのシステムデザインにおけるモデリング結果

A.1　製品システムモデルのモデリング結果

A.1.1　放射線計測システムの理想システム構成のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した理想システム構成要素と要求との対応関係の記述結果を述べる。要求図を用いて詳細化した要求に対して、システム構成要素を充足関係で結び、どの要求をどの構成要素で満たすのか、またその構成要素が満たすべき仕様を明らかにする。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.1～Fig. A.10 に示す。Fig. A.1 は信号処理部と要求の関係、Fig. A.2 はバックグラウンド遮蔽部と要求の関係、Fig. A.3 は温度センサおよび温度補償機能と要求の関係、Fig. A.4 は反射材、遮光材、光検出デバイスと要求の関係、Fig. A.5 は核種判別機能と要求の関係、Fig. A.6 はスペクトルデータ作成機能と要求の関係、Fig. A.7 はデータ保存機能と要求の関係、Fig. A.8 は試料容器と要求の関係、Fig. A.9 は H-SRBC ケースと要求の関係、Fig. A.10 は電源部と要求の関係を記述した結果を示している。

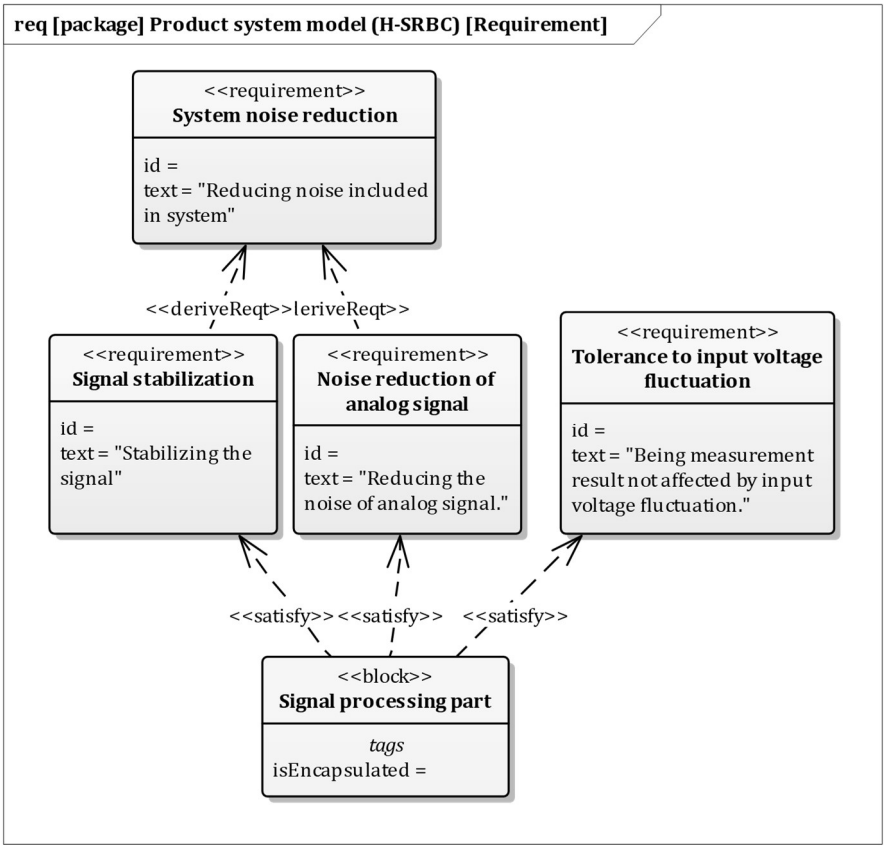


Fig. A.1　Relationship between requirement and signal processing part.

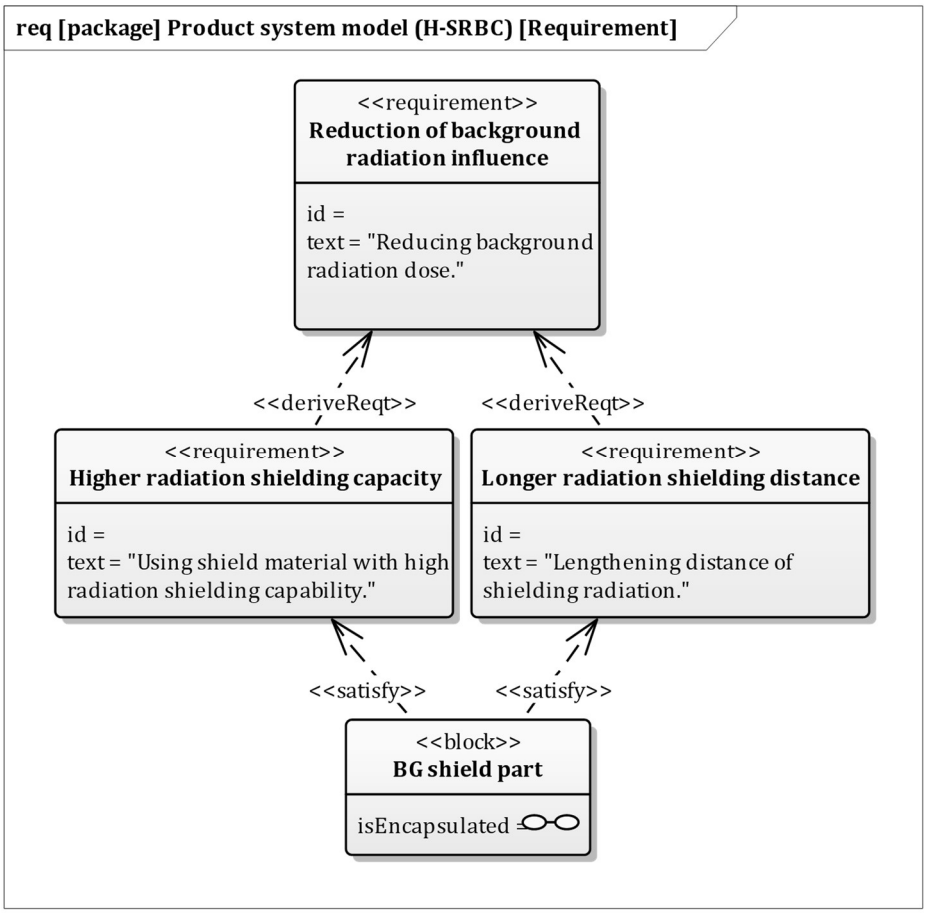


Fig. A.2 Relationship between requirement and BG shield part.

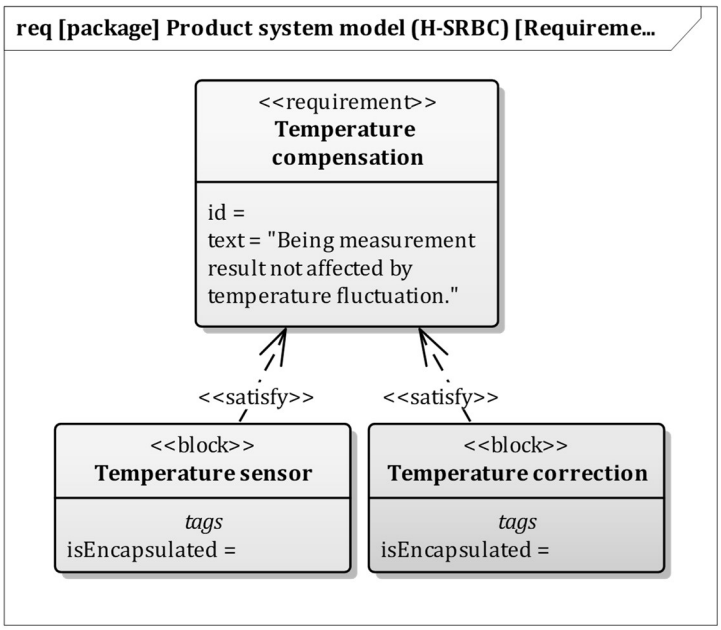


Fig. A.3 Relationship between requirement and temperature sensor/ temperature correction.

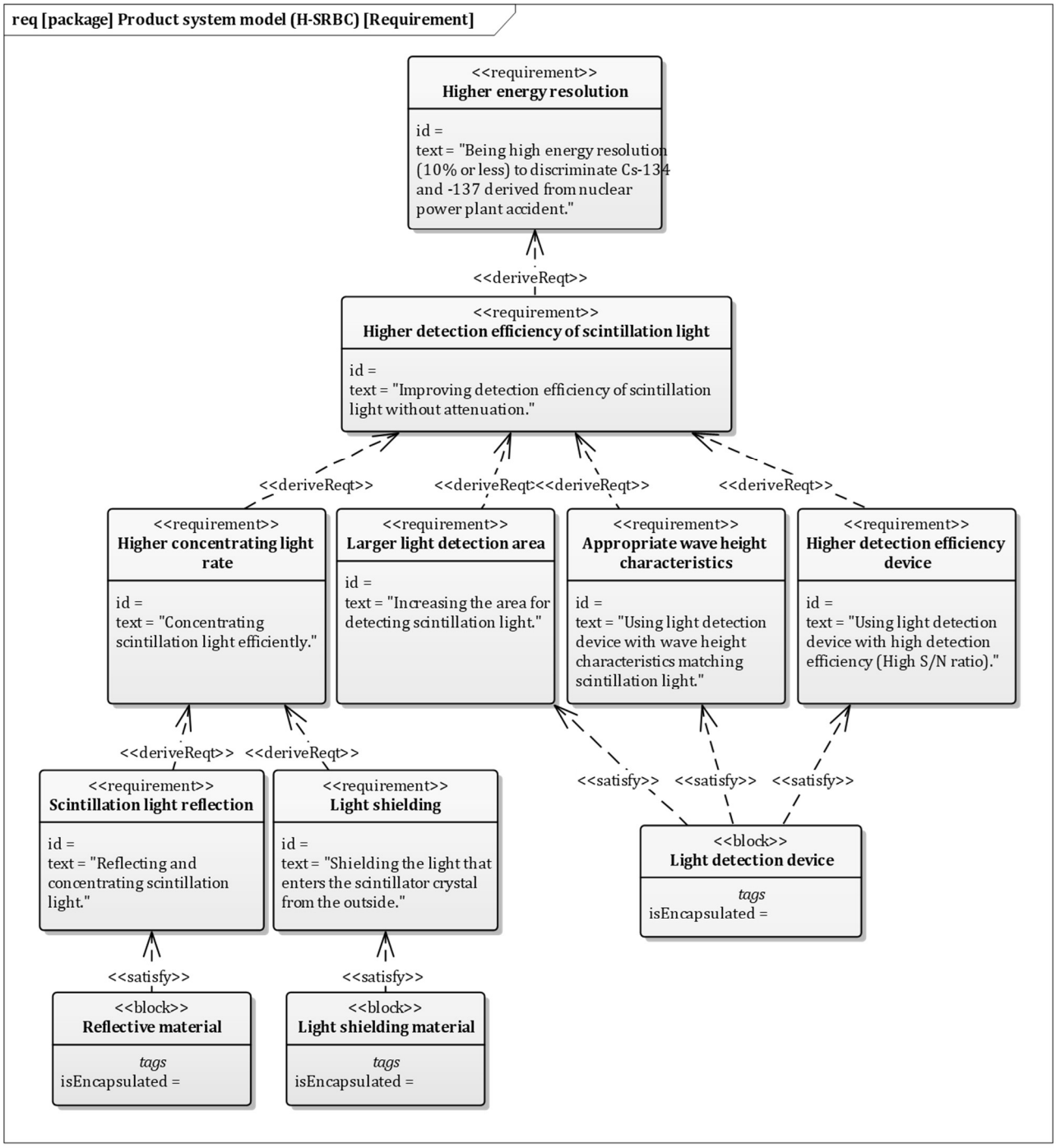


Fig. A.4 Relationship between requirement and reflective material/ light shielding material/ light detection device.

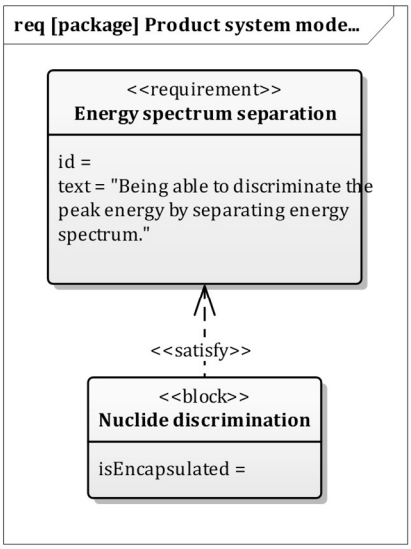


Fig. A.5 Relationship between requirement and nuclide discrimination.

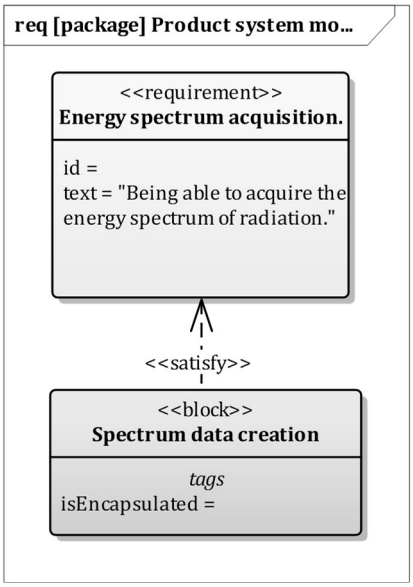


Fig. A.6 Relationship between requirement and spectrum data creation.

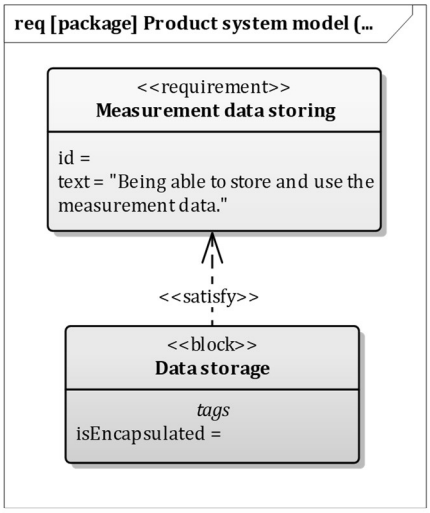


Fig. A.7 Relationship between requirement and data storage.

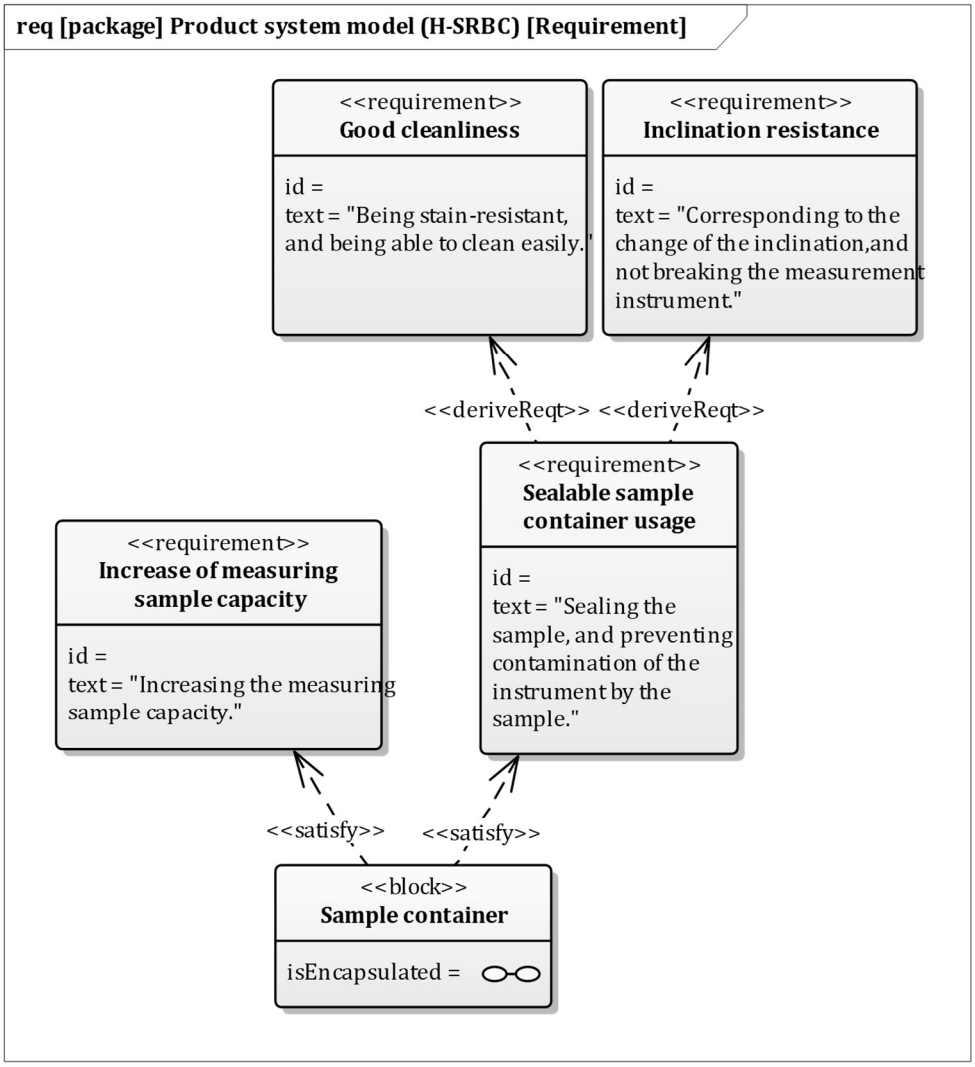


Fig. A.8 Relationship between requirement and sample container.

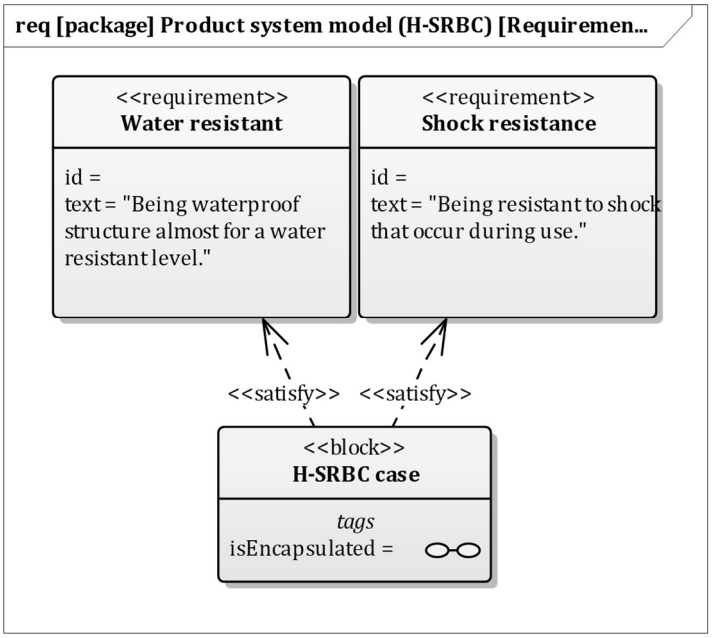


Fig. A.9 Relationship between requirement and H-SRBC case.

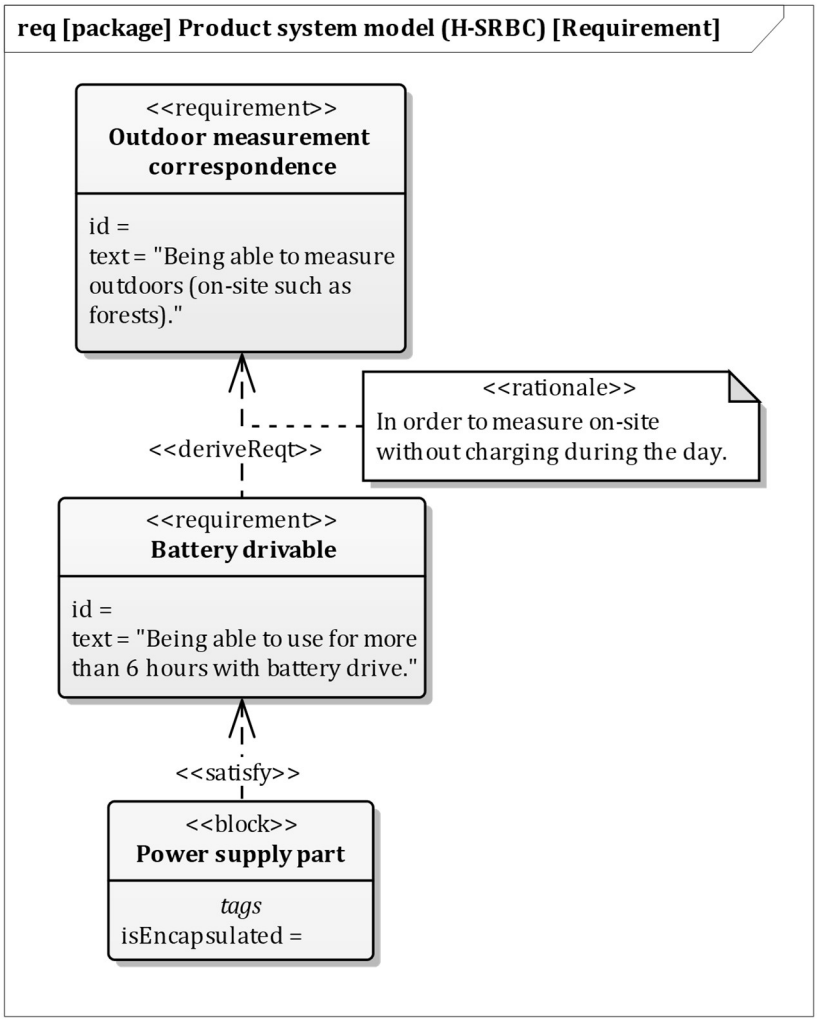


Fig. A.10　Relationship between requirement and power supply part.

このように、理想システム構成をモデリングし、さらにシステム構成要素と要求との関係を明確に記述することができた。

A.1.2　理想システム構成に関する制約関係のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した理想システム構成に関する制約関係の記述結果を述べる。ブロック定義図でパラメータの型、制約式を記述し、内部ブロック図で各パラメータがどの構成要素に属するかを記述し、パラメトリック図で制約関係を可視的に記述する。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.11～Fig. A.22 に示す。パラメータの型を記述した結果は重複するため省略し、各構成要素に関して、ブロック定義図を用いた制約式、内部ブロック図、パラメトリック図を記述した結果を順に示す。Fig. A.11～Fig. A.13 は H-SRBC

全体の重量に関する制約関係、Fig. A.14～Fig. A.16 はバックグラウンド遮蔽部の重量に関する制約関係、Fig. A.17～Fig. A.19 は空間放射線の線量に関する制約関係、Fig. A.20～Fig. A.22 は試料の γ 線放出に関する制約関係を記述した結果を示している。

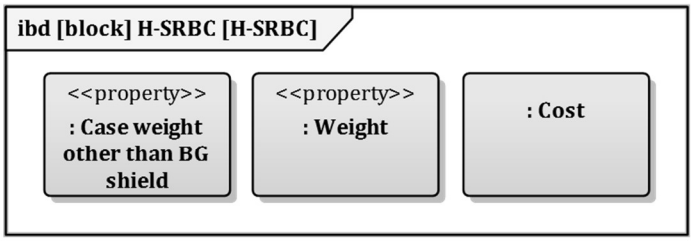


Fig. A.11　Result of assigning parameter to H-SRBC.

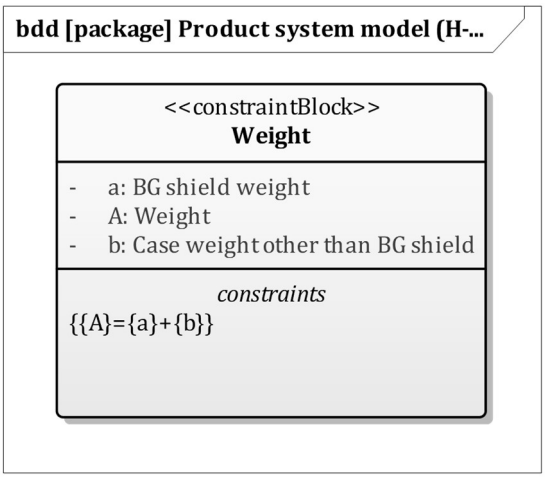


Fig. A.12　Description result of constraint relating to weight.

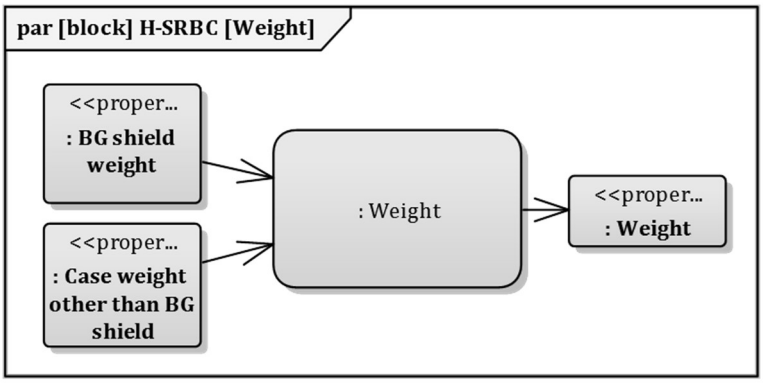


Fig. A.13　Description result of constraint relationship relating to weight.

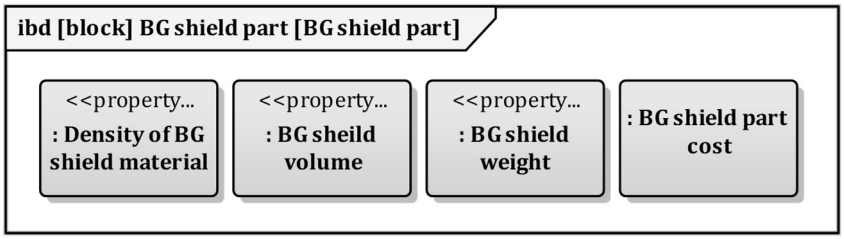


Fig. A.14 Result of assigning parameter to BG shield part.

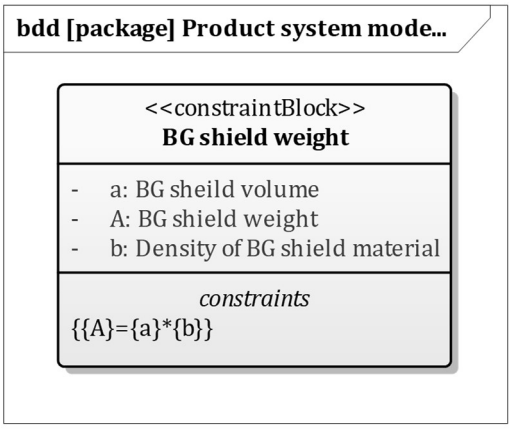


Fig. A.15 Description result of constraint relating to BG shield weight.

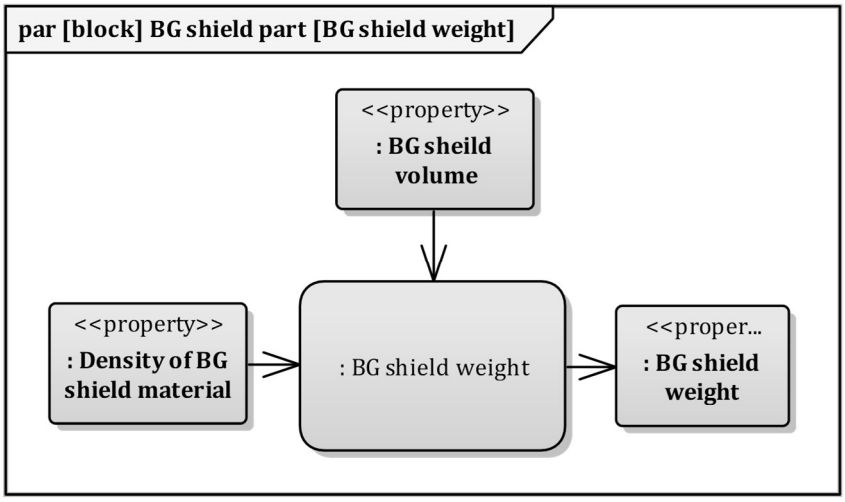


Fig. A.16 Description result of constraint relationship relating to BG shield weight.

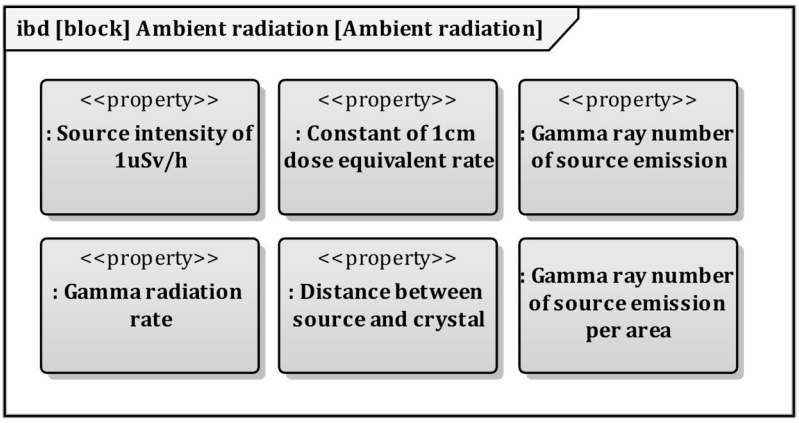


Fig. A.17 Result of assigning parameter to ambient radiation.

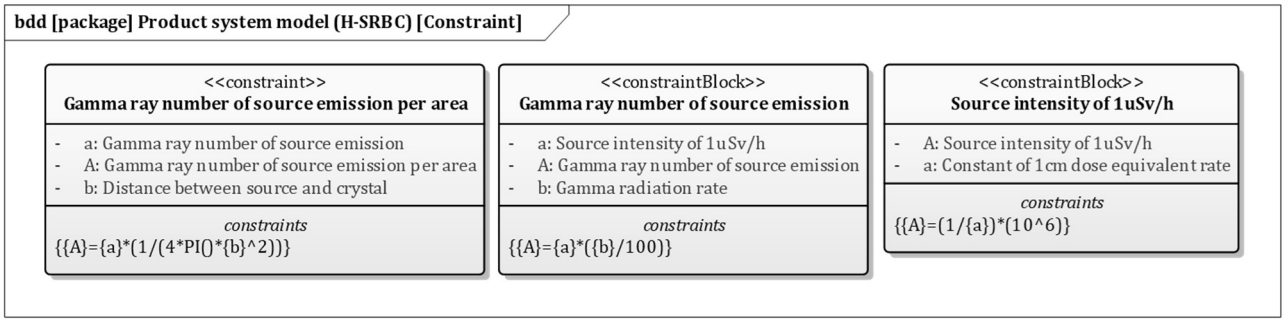


Fig. A.18 Description result of constraint relating to gamma ray emission.

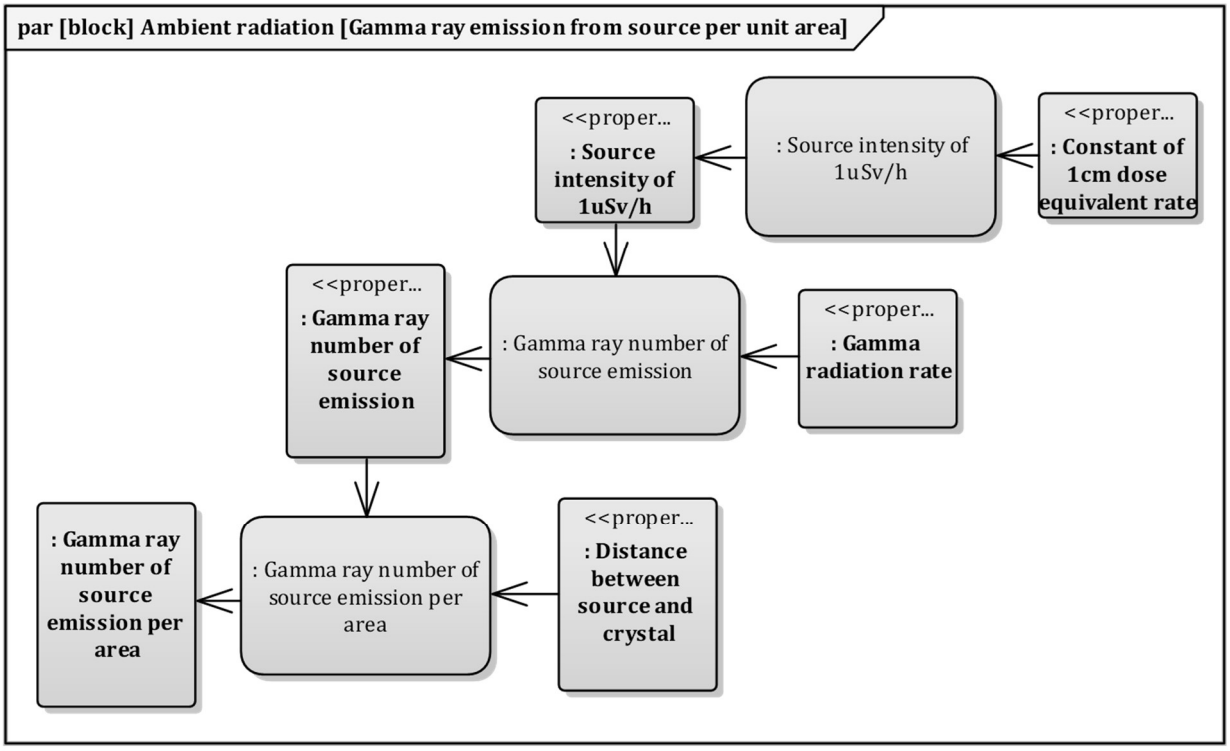


Fig. A.19 Description result of constraint relationship relating to gamma ray emission.

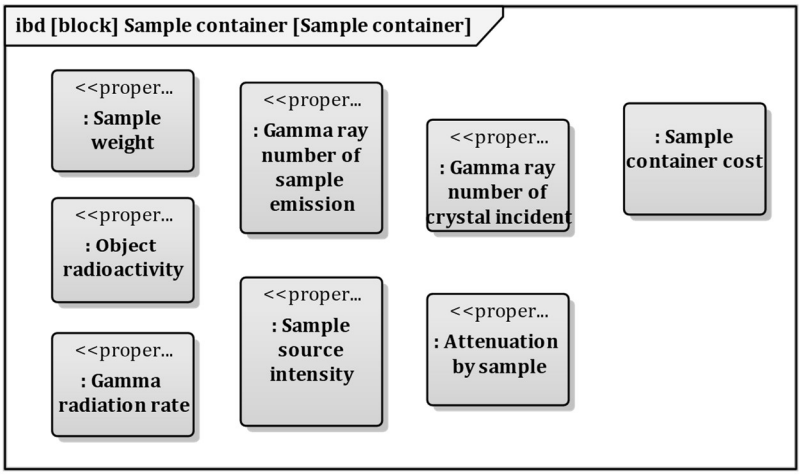


Fig. A.20 Result of assigning parameter to sample container.

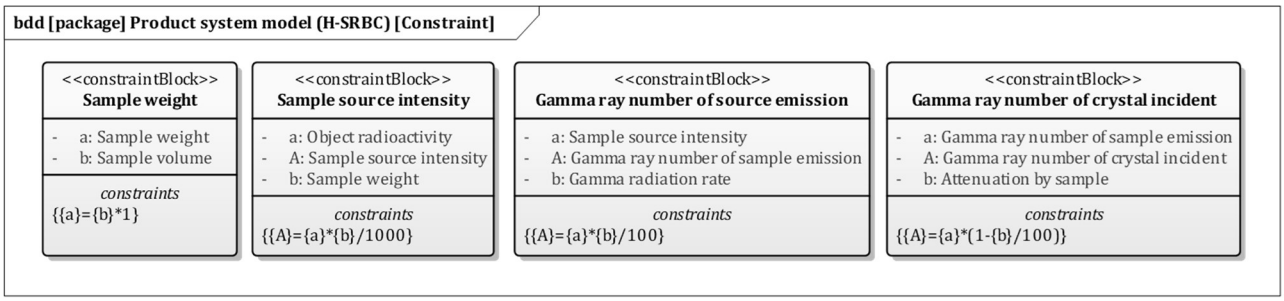


Fig. A.21 Description result of constraint relating to gamma ray incident.

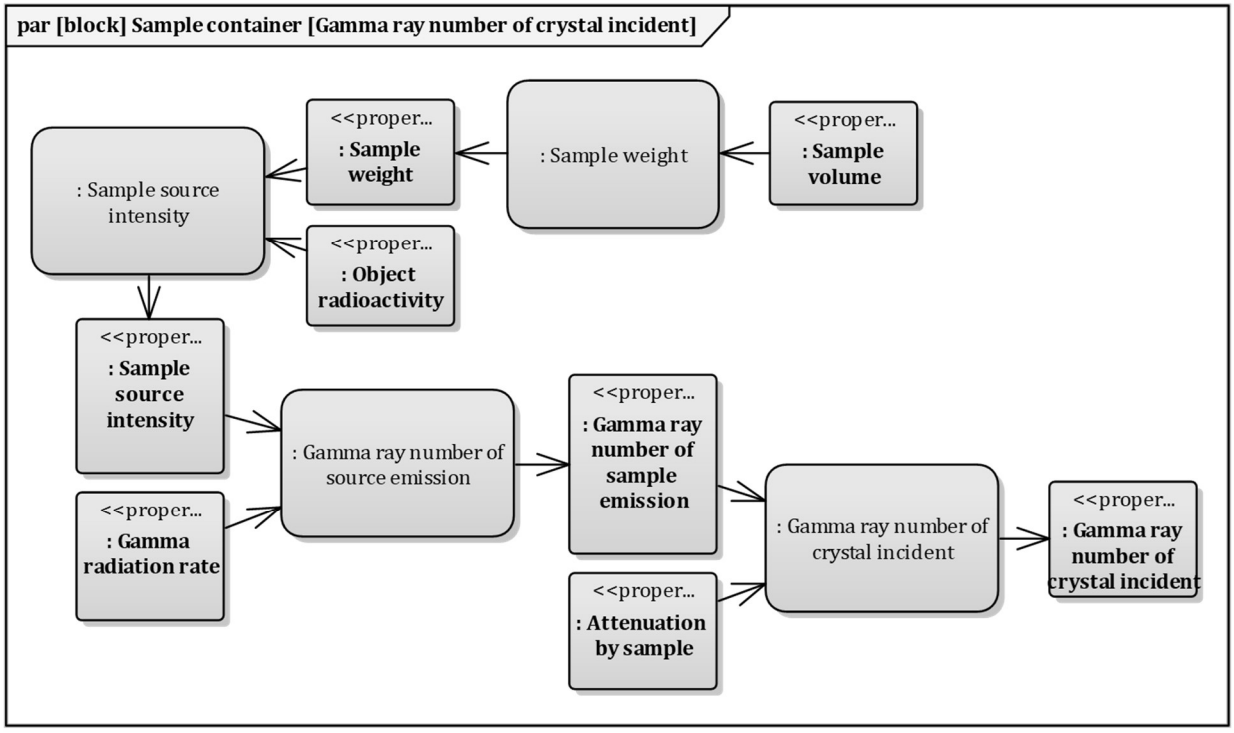


Fig. A.22 Description result of constraint relationship relating to gamma ray incident.

このように、理想システム構成に関する制約関係をモデリングすることができた。

A.2　設計空間固有モデルのモデリング結果

A.2.1　設計空間に関する要求のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した具体的なシステム構造(例えば形状や材料など)を導出するような要求の記述結果を述べる。要求図を用いて、製品システムモデルで定義した要求をさらに詳細化する。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.23～Fig. A.26 に示す。これらの記述結果には、要求と具体的なシステム構造要素との関係も記述している。Fig. A.23 は信号処理部の要素に繋がる要求、Fig. A.24 は直方形 CsI(Tl)シンチレータ結晶に繋がる要求、Fig. A.25 は円筒形 Pb バックグラウンド遮蔽材に繋がる要求、Fig. A.26 は中空直方形 Al ハウジングケースに繋がる要求を記述した結果を示している。

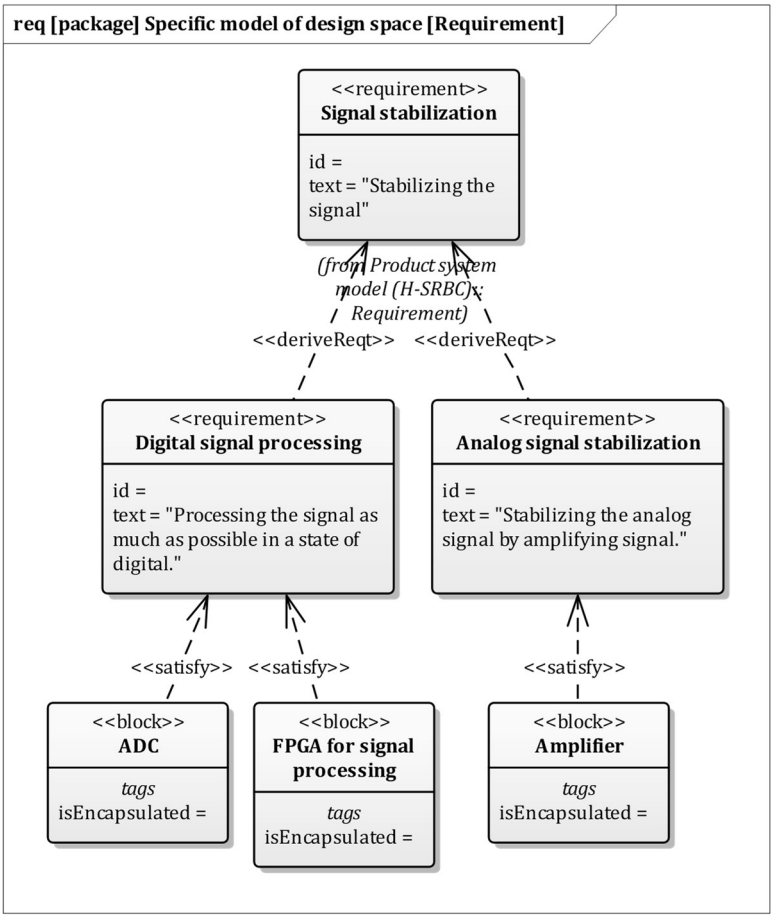


Fig. A.23　Relationship between requirement and signal processing part component.

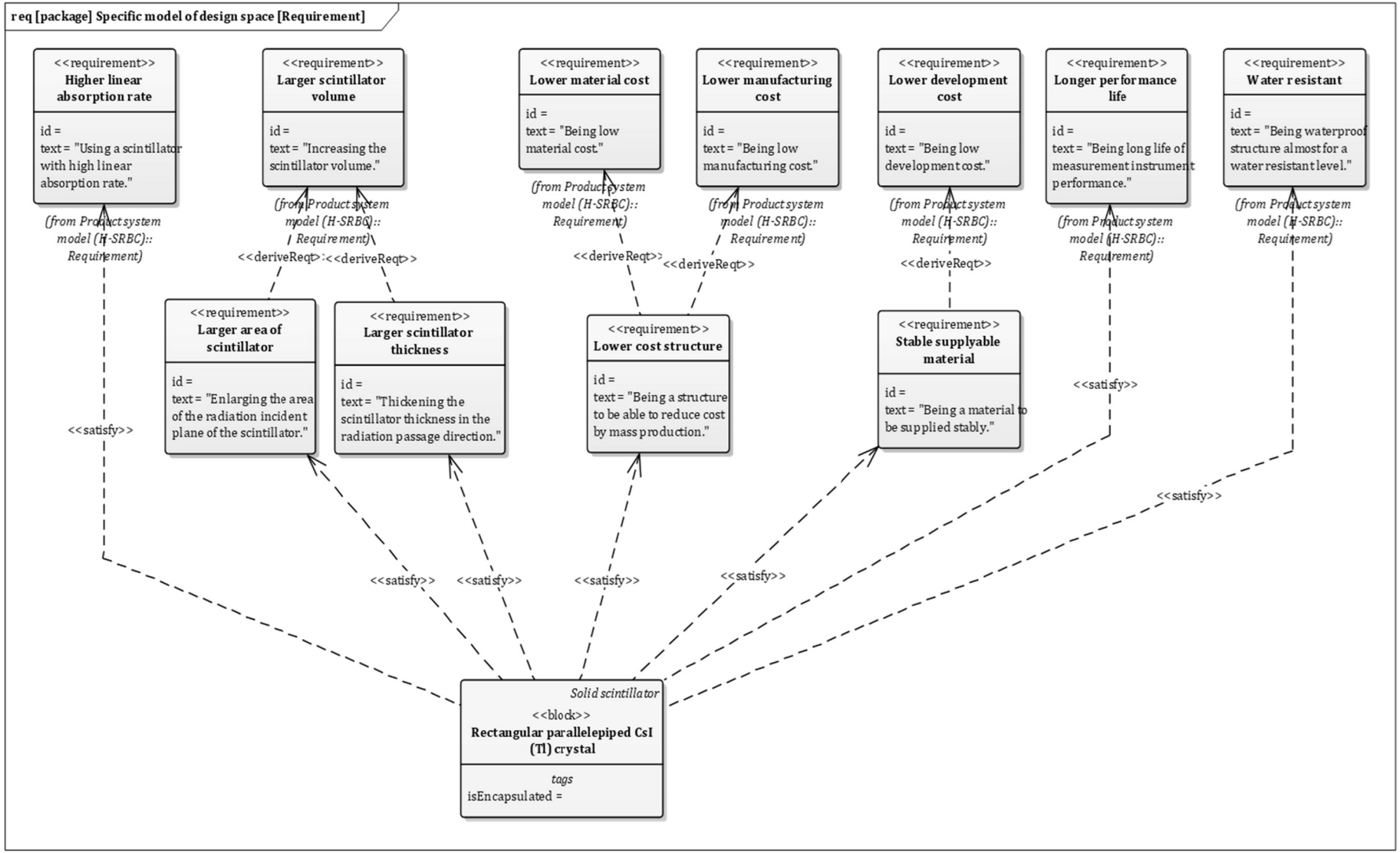


Fig. A.24 Relationship between requirement and rectangular parallelepiped CsI (Tl) crystal.

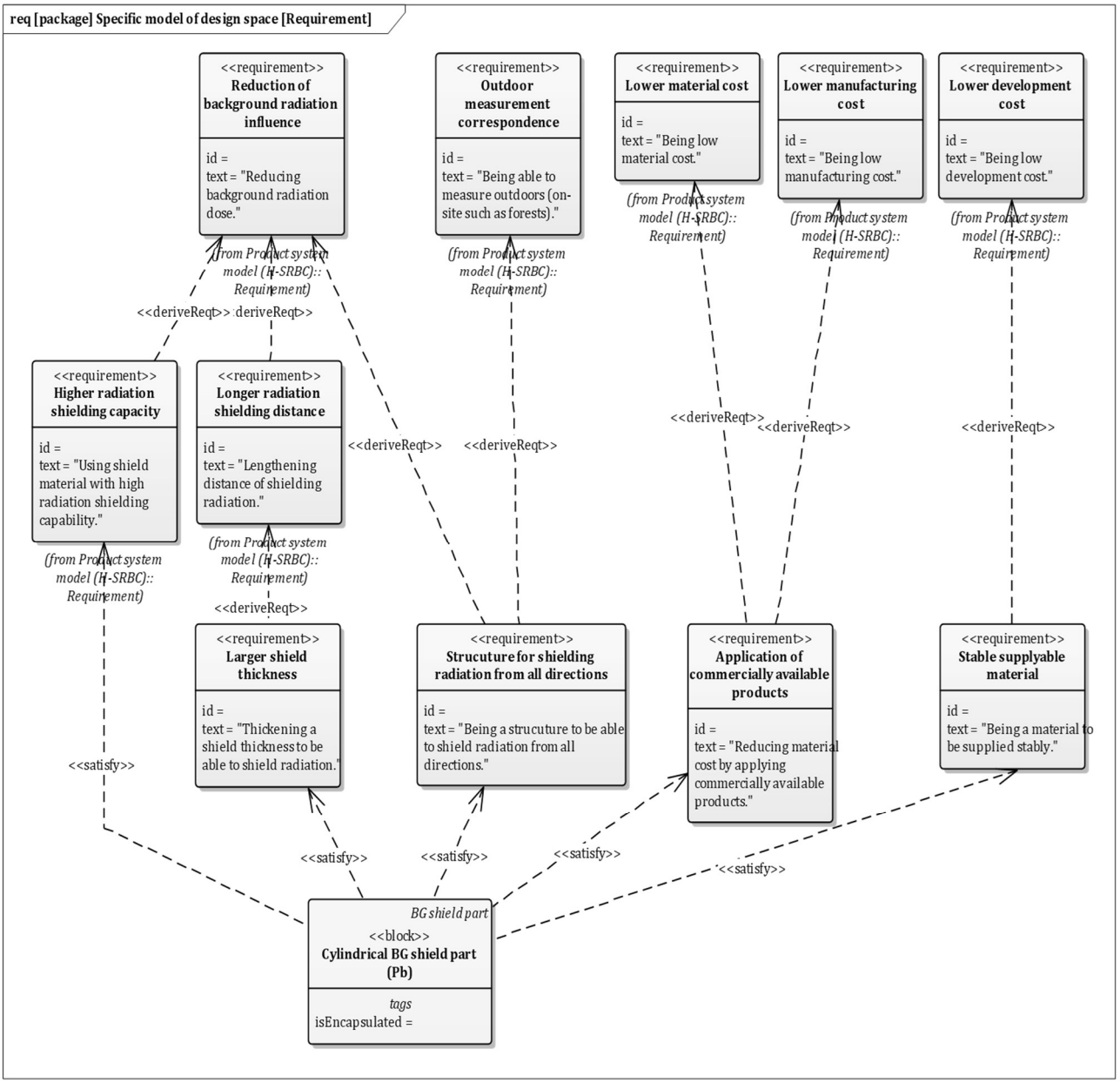


Fig. A.25 Relationship between requirement and cylindrical BG Shield part (Pb).

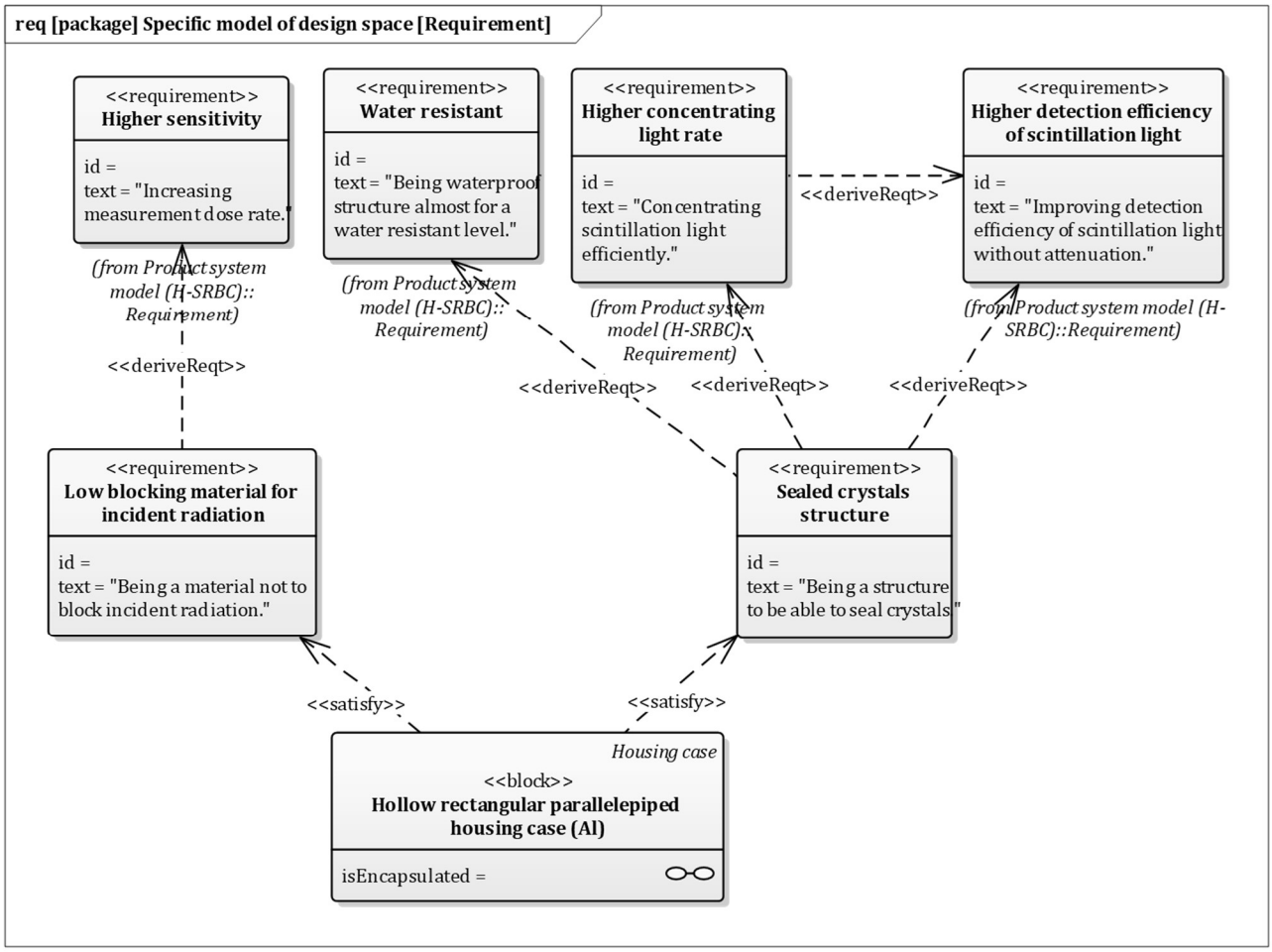


Fig. A.26　Relationship between requirement and hollow rectangular parallelepiped housing case (Pb).

このように、設計空間に関する要求と、具体的なシステム構造との関係をモデリングすることができた。

A.2.2　設計空間に関する放射線計測システムの具体的なシステム構造のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した設計意図や設計目的から具体化されたシステム構造の記述結果を述べる。ブロック定義図を用いて、製品システムモデルで定義したシステム構成に対して、具体的なシステム構造を記述する。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.27～Fig. A.33 に示す。Fig. A.27 は光検出デバイスの具体的な部品、Fig. A.28 は信号処理部の構成要素、Fig. A.29 は制御部の具体的な構造選択、Fig. A.30 は電源部の具体的な構造選択、Fig. A.31 は計算部の具体的な構造選択、Fig. A.32 は表示部の具体的な構造選択、Fig. A.33 は位置センサの具体的な構造選択を記述した結果を示している。

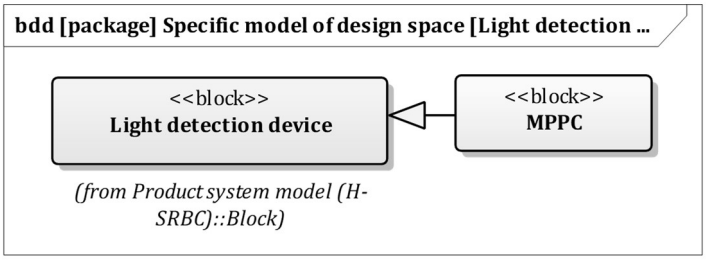


Fig. A.27 Specific system structure of light detection device.

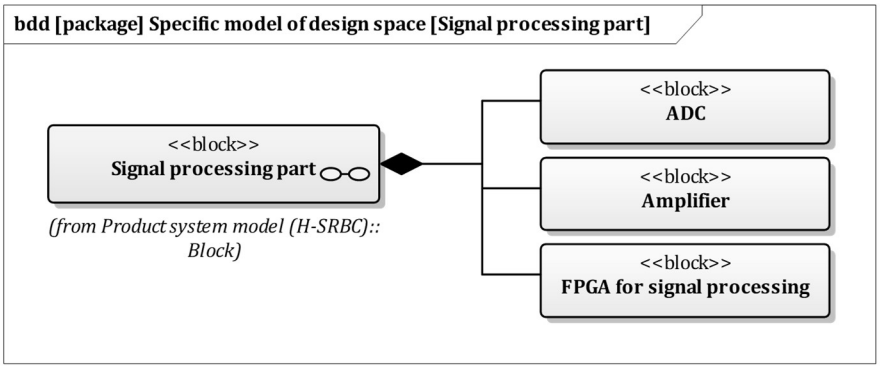


Fig. A.28 Specific system structure of signal processing part.

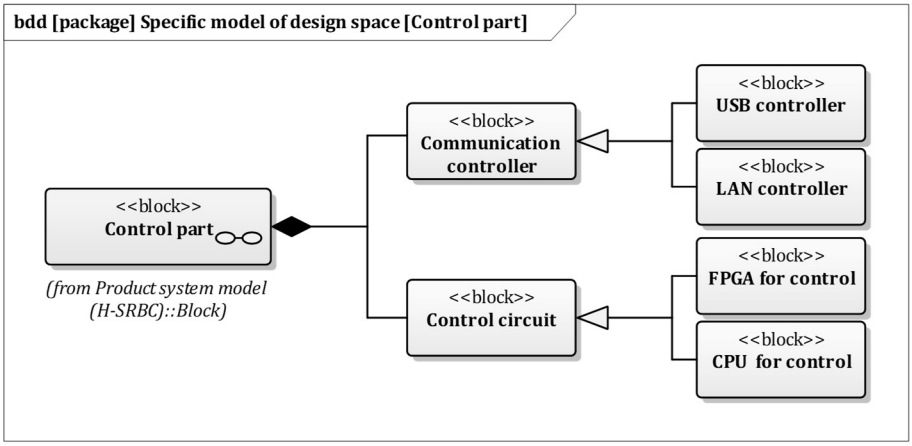


Fig. A.29 Specific system structure of control part.

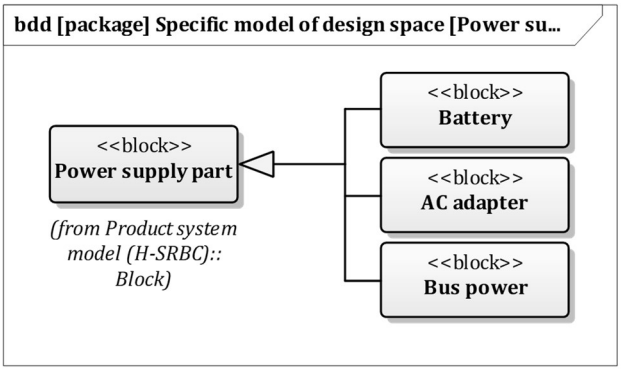


Fig. A.30 Specific system structure of power supply part.

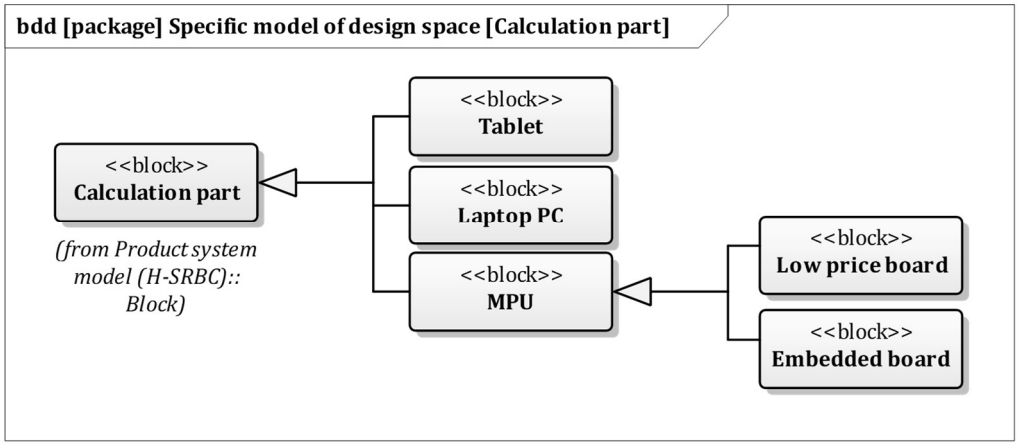


Fig. A.31　Specific system structure of calculation part.

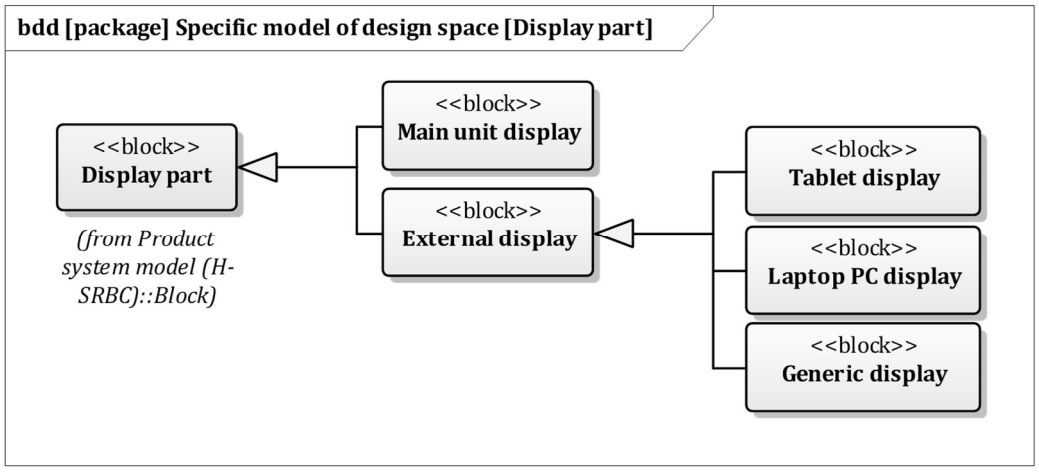


Fig. A.32　Specific system structure of display part.

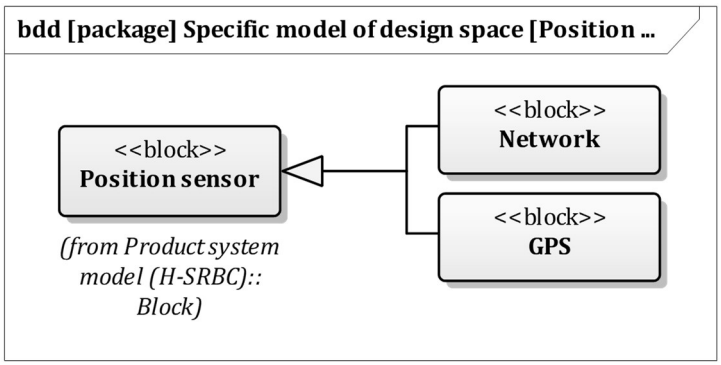


Fig. A.33　Specific system structure of position sensor.

このように、設計空間に関する具体的なシステム構造をモデリングすることができた。

A.2.3　具体的なシステム構造に関する制約関係のモデリング結果

ここでは、第4章で示した具体的なシステム構造に関する制約関係の記述結果を述べる。ブロック定義図でパラメータの型、制約式を記述し、内部ブロック図で各パラメータがどの構成要素に属するかを記述し、パラメトリック図で制約関係を可視的に記述する。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.34～Fig. A.59 に示す。パラメータの型を記述した結果は重複するため省略し、各構造要素に関して、ブロック定義図を用いた制約式、内部ブロック図、パラメトリック図を記述した結果を順に示す。Fig. A.34～Fig. A.36 は H-SRBC ケースの体積に関する制約関係、Fig. A.37～Fig. A.41 は円筒形 Pb バックグラウンド遮蔽部の遮蔽効果と体積に関する制約関係、Fig. A.42～Fig. A.44 は円筒試料容器の体積に関する制約関係、Fig. A.45～Fig. A.47 は検知部実体のエネルギー分解能に関する制約関係、Fig. A.48～Fig. A.50 は直方形センサ部の感度に関する制約関係、Fig. A.51～Fig. A.59 は直方形 CsI(Tl) シンチレータ結晶の縦横条件、体積、幾何学的エネルギー分解能、絶対効率に関する制約関係を記述した結果を示している。

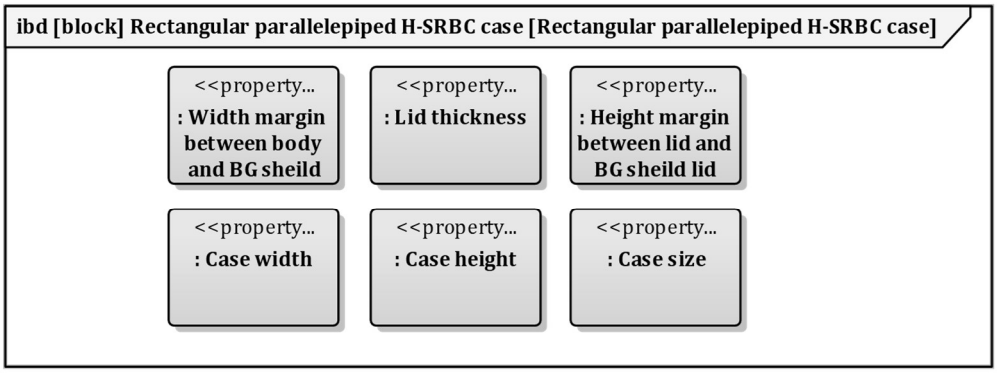


Fig. A.34　Result of assigning parameter to rectangular parallelepiped H-SRBC case.

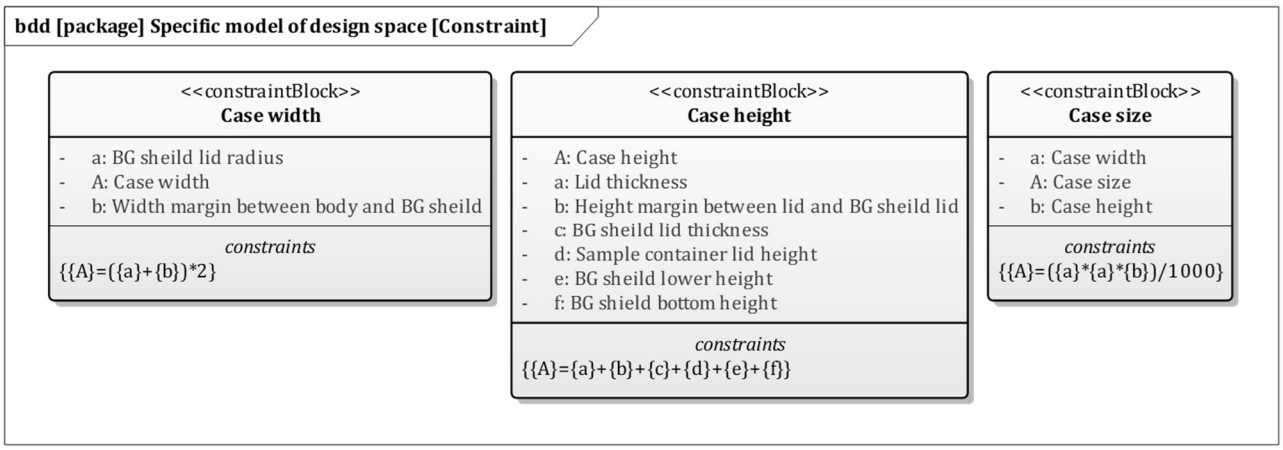


Fig. A.35　Description result of constraint relating to case size.

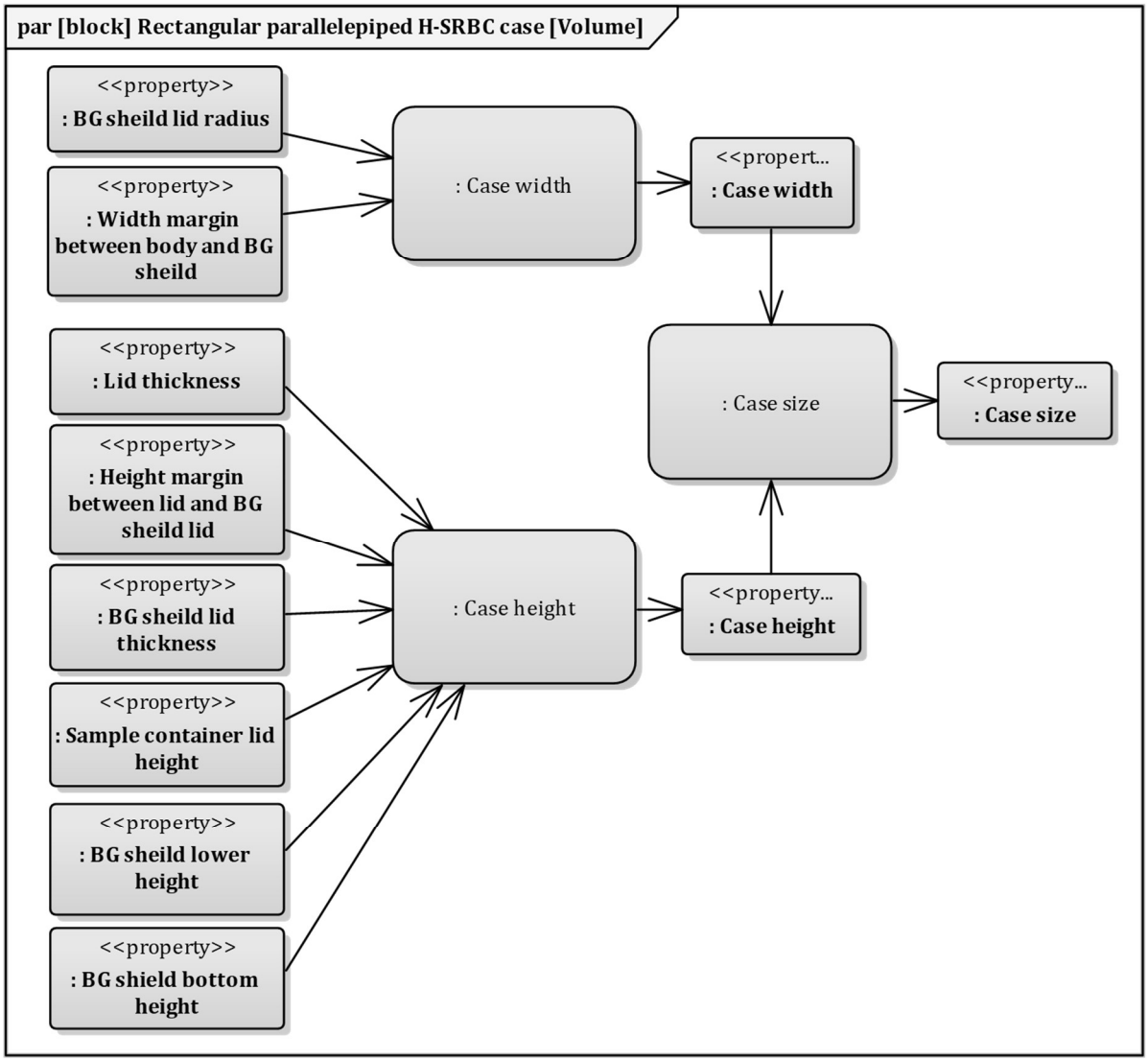


Fig. A.36 Description result of constraint relationship relating to case size.

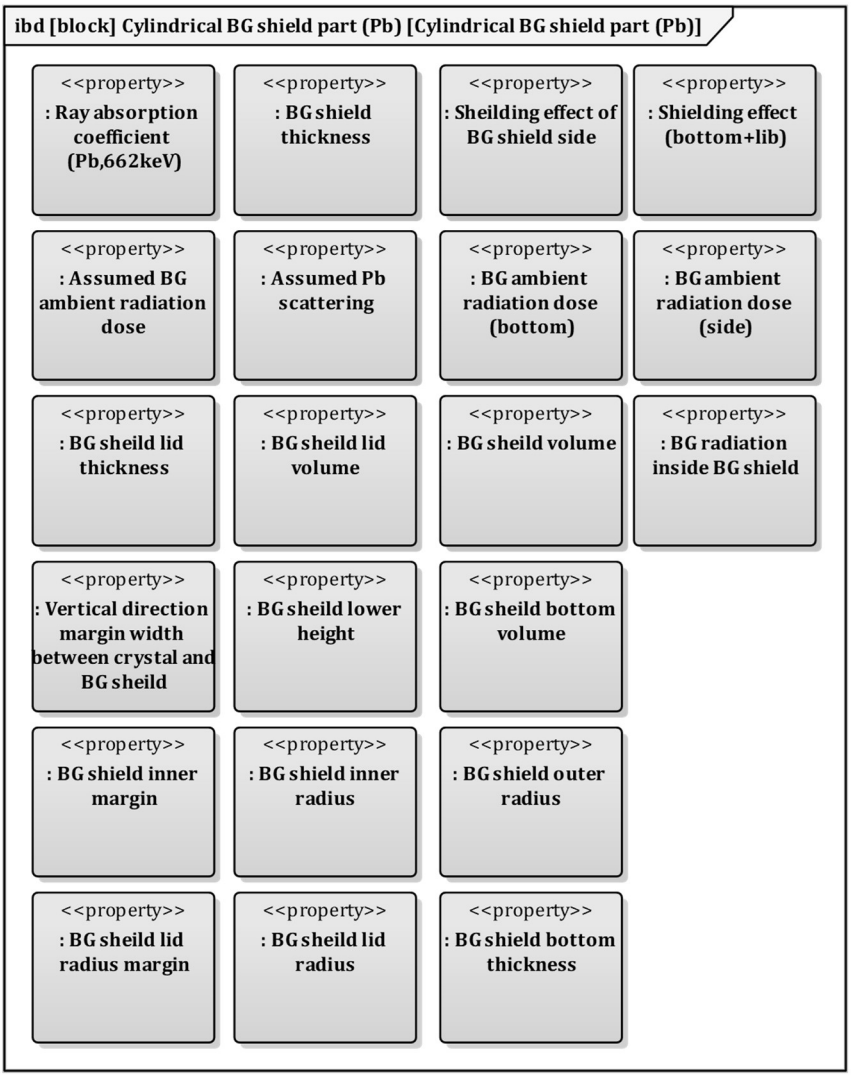


Fig. A.37 Result of assigning parameter to cylindrical BG shield part (Pb).

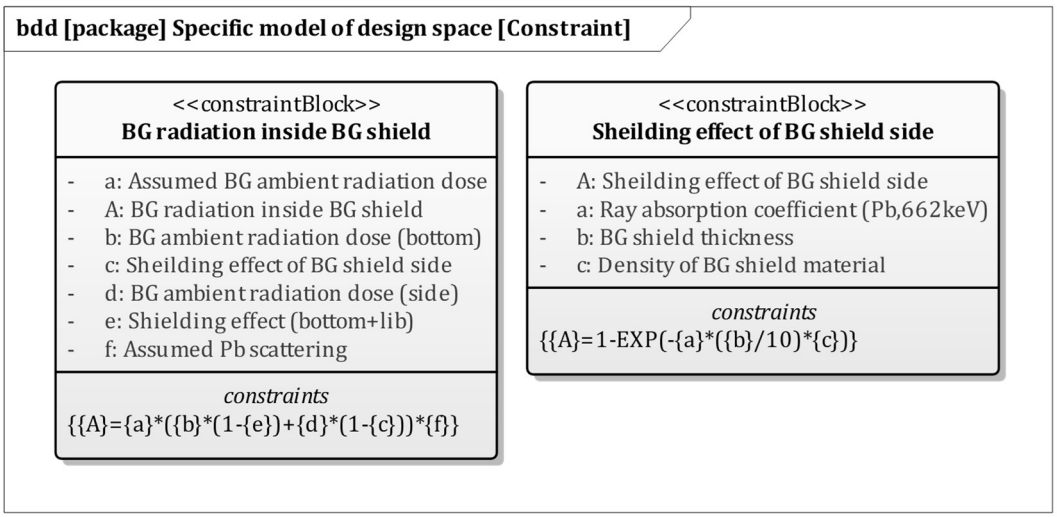


Fig. A.38 Description result of constraint relating to shielding effect.

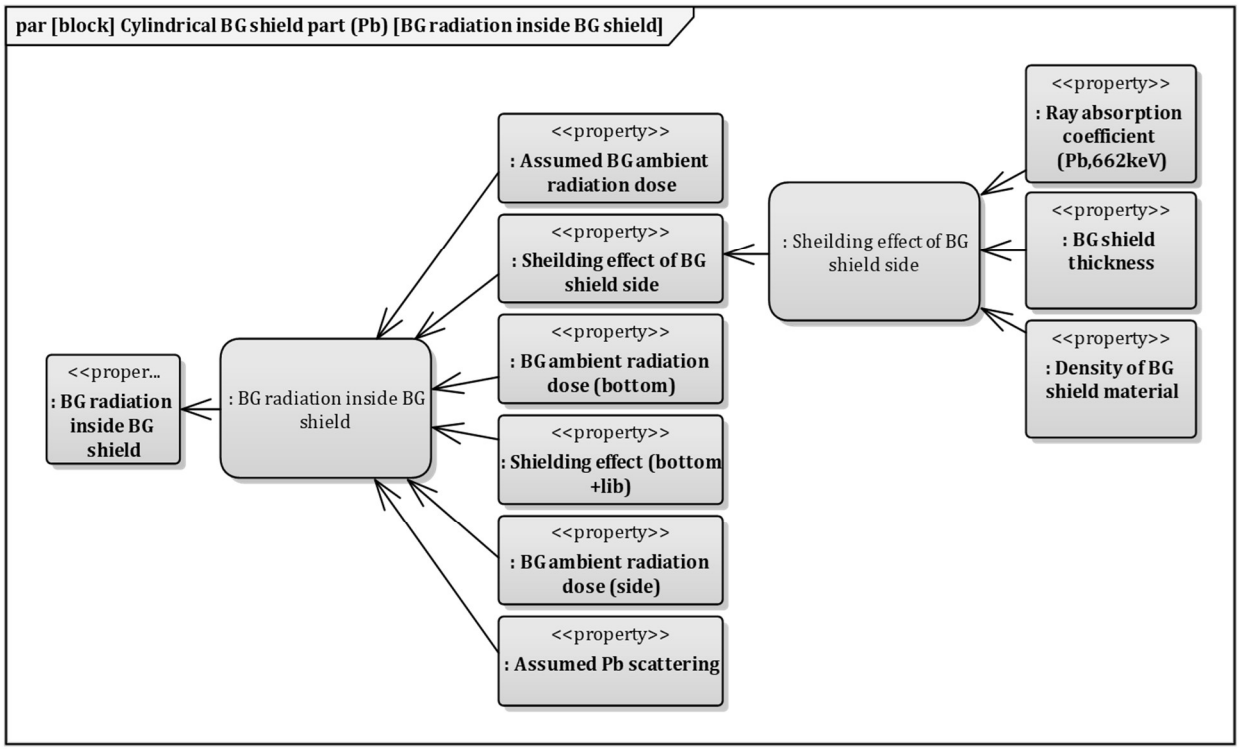


Fig. A.39 Description result of constraint relationship relating to shielding effect.

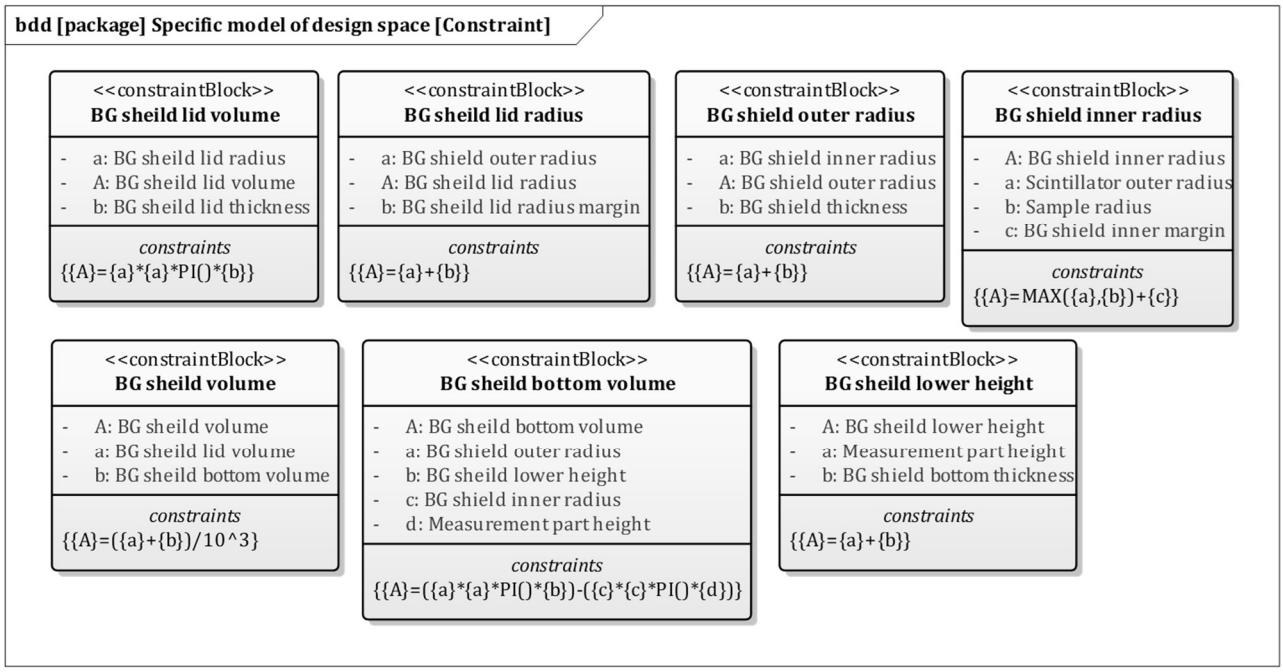


Fig. A.40 Description result of constraint relating to BG shield volume.

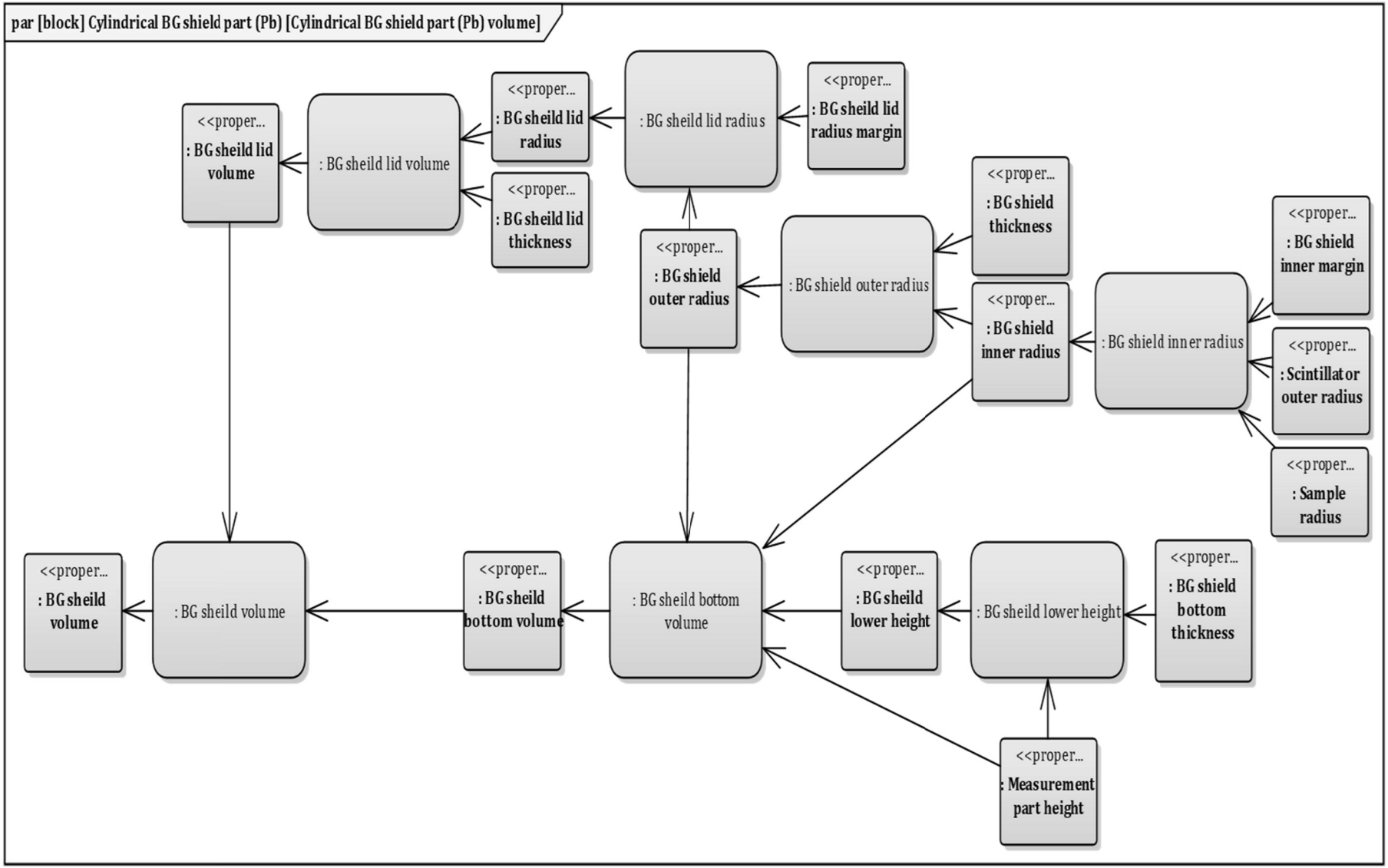


Fig. A.41 Description result of constraint relationship relating to BG shield volume.

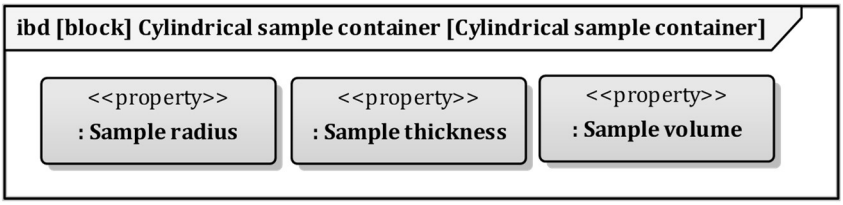


Fig. A.42 Result of assigning parameter to cylindrical sample container.

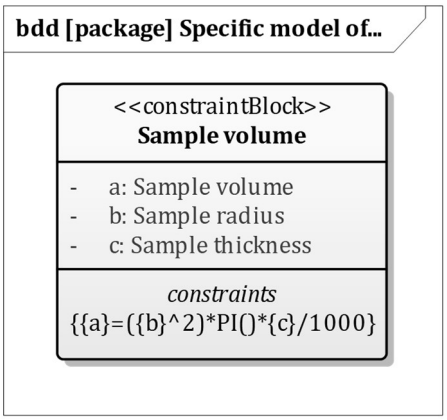


Fig. A.43 Description result of constraint relating to sample volume.

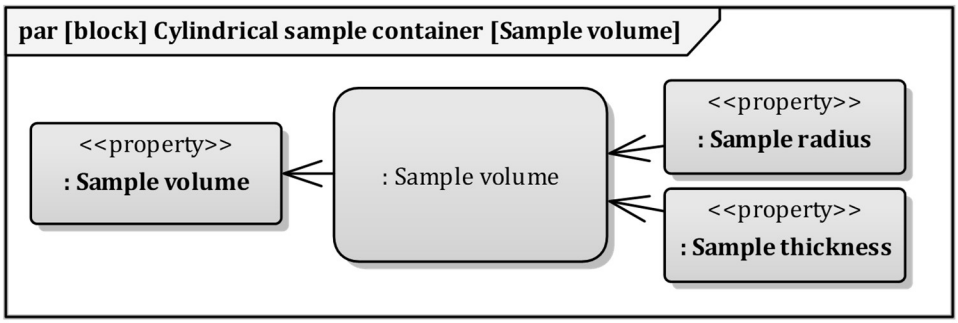


Fig. A.44 Description result of constraint relationship relating to sample volume.

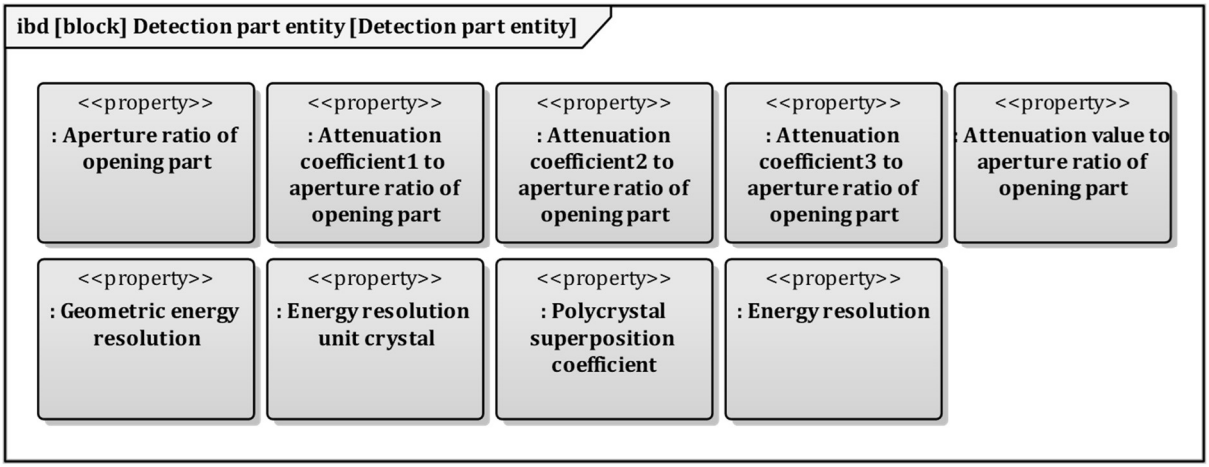


Fig. A.45 Result of assigning parameter to detection part entity.

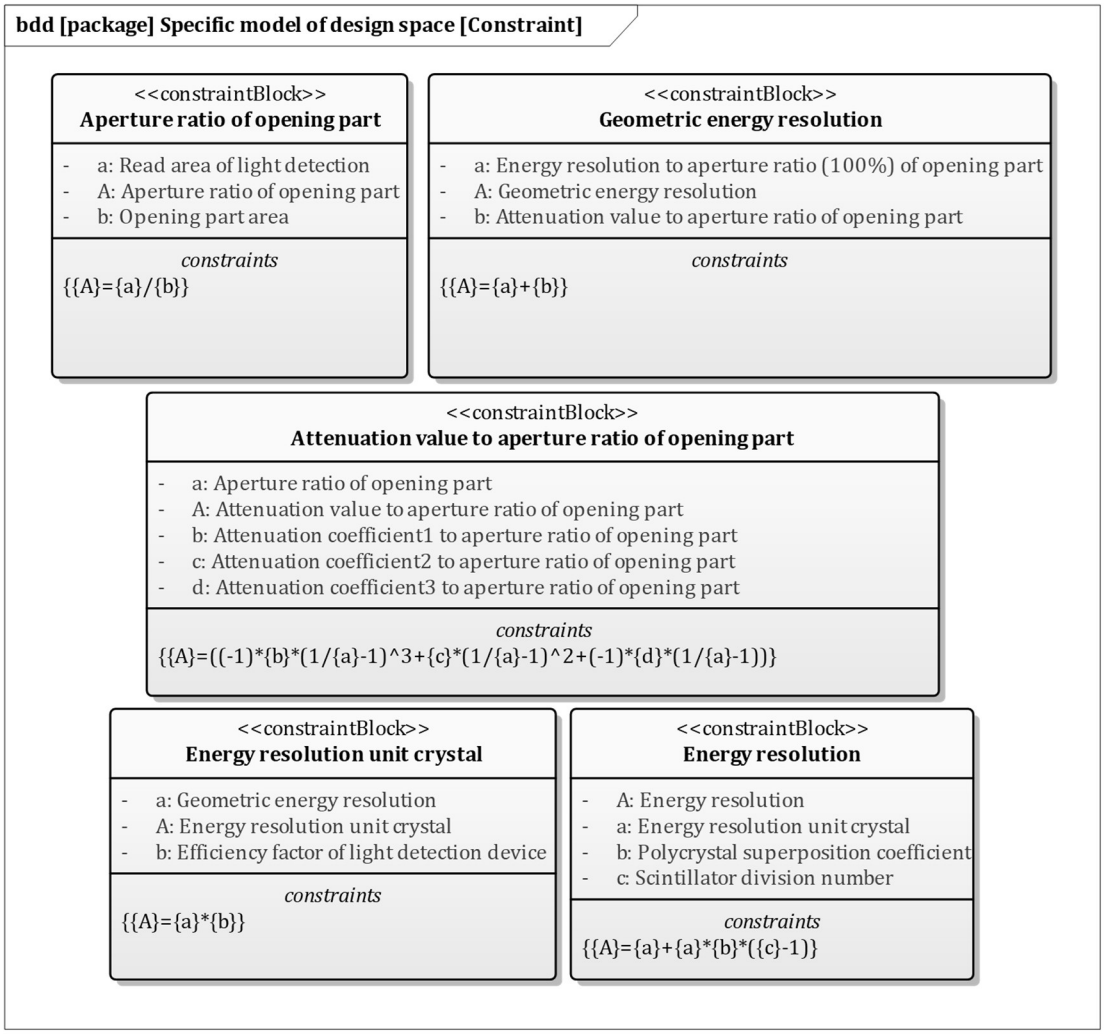


Fig. A.46 Description result of constraint relating to energy resolution.

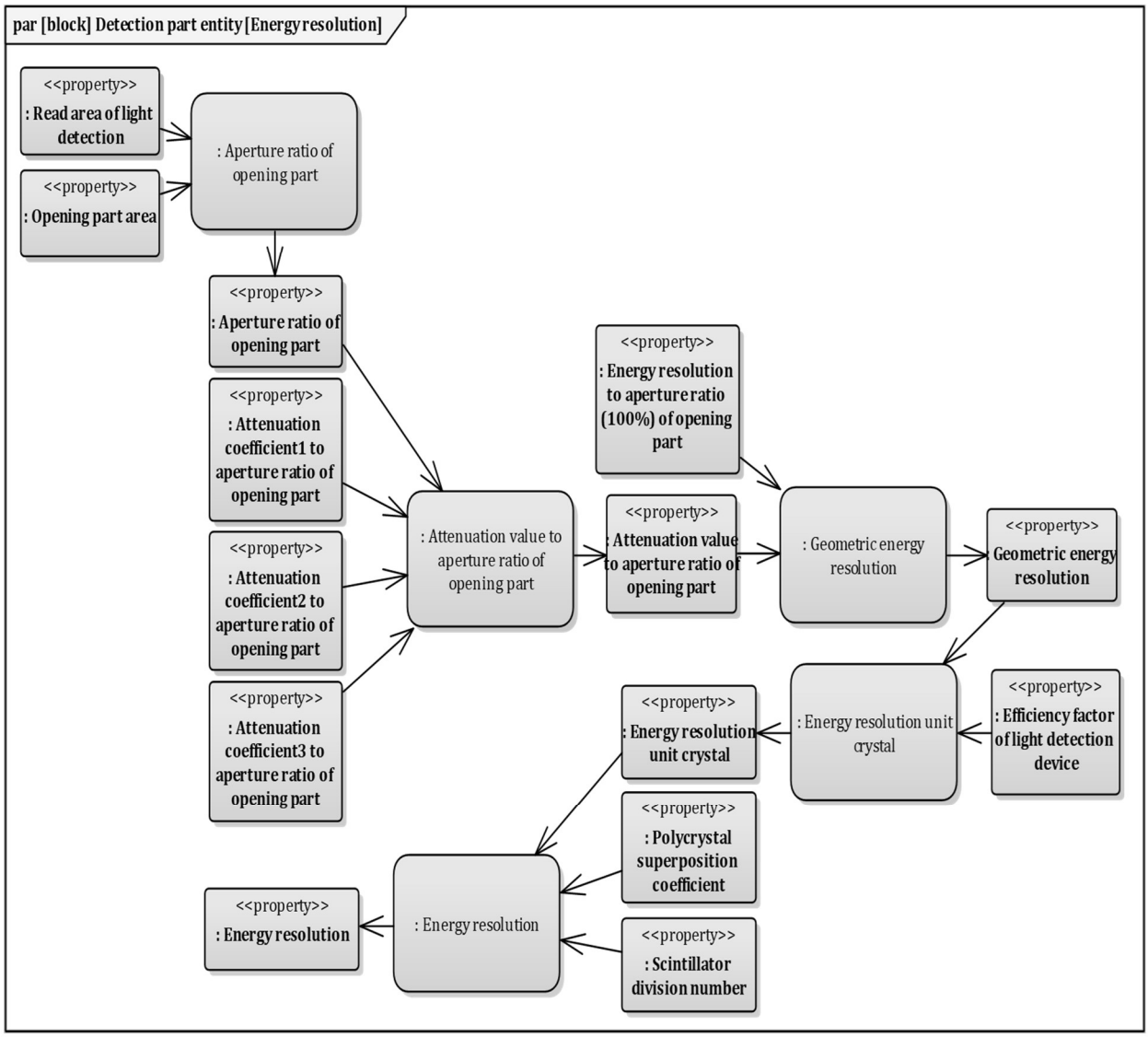


Fig. A.47 Description result of constraint relationship relating to energy resolution.

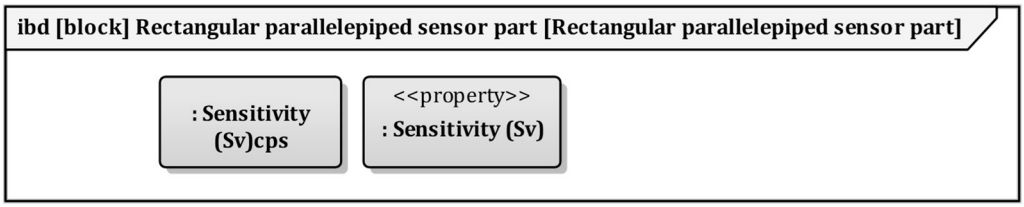


Fig. A.48 Result of assigning parameter to rectangular parallelepiped sensor part.

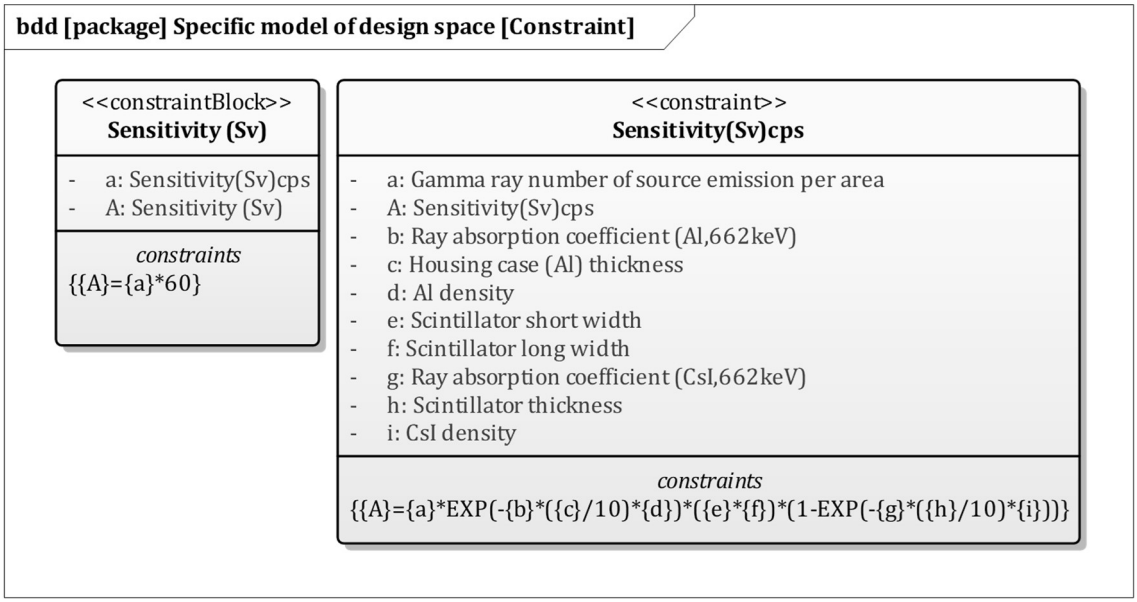


Fig. A.49 Description result of constraint relating to sensitivity.

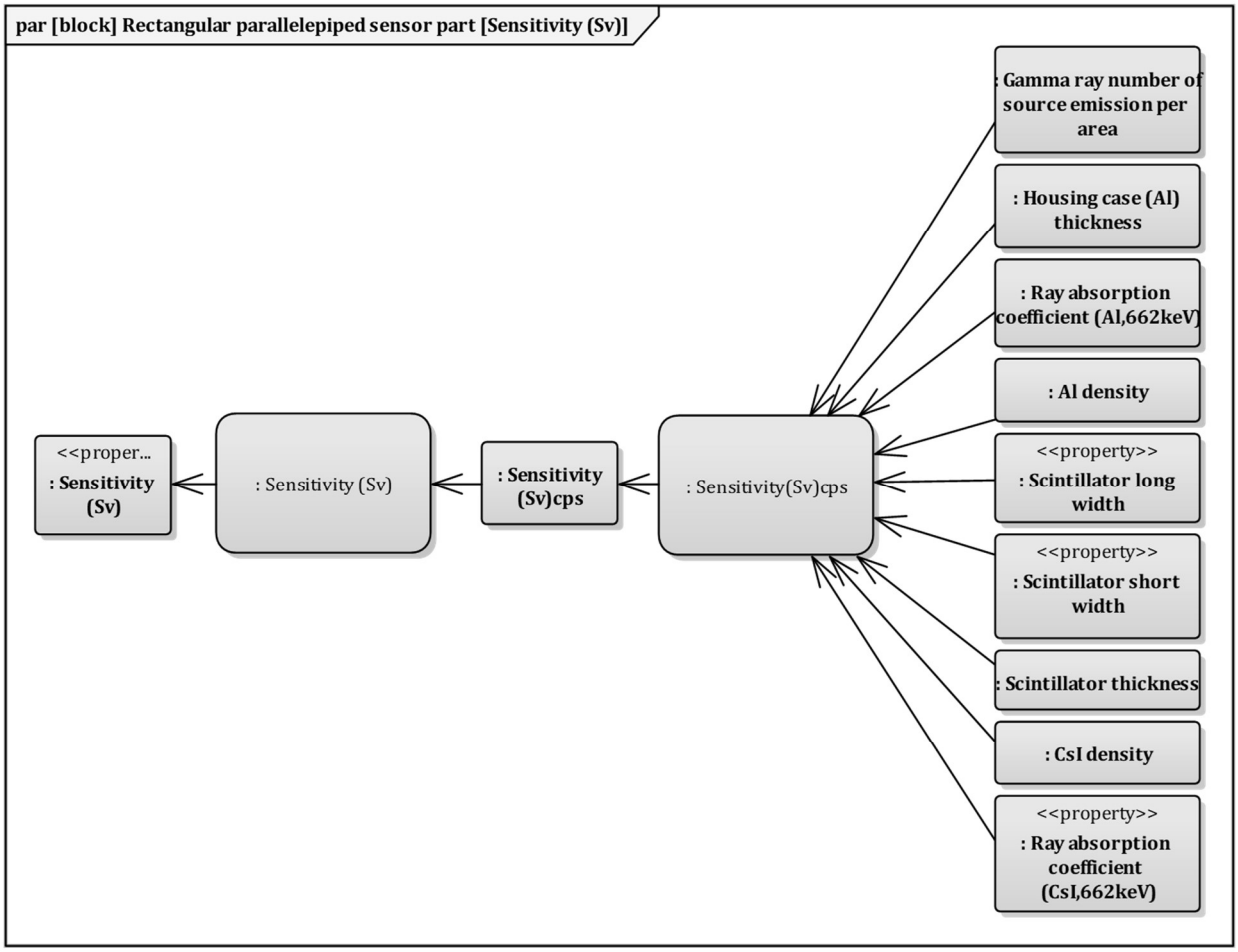


Fig. A.50 Description result of constraint relationship relating to sensitivity.

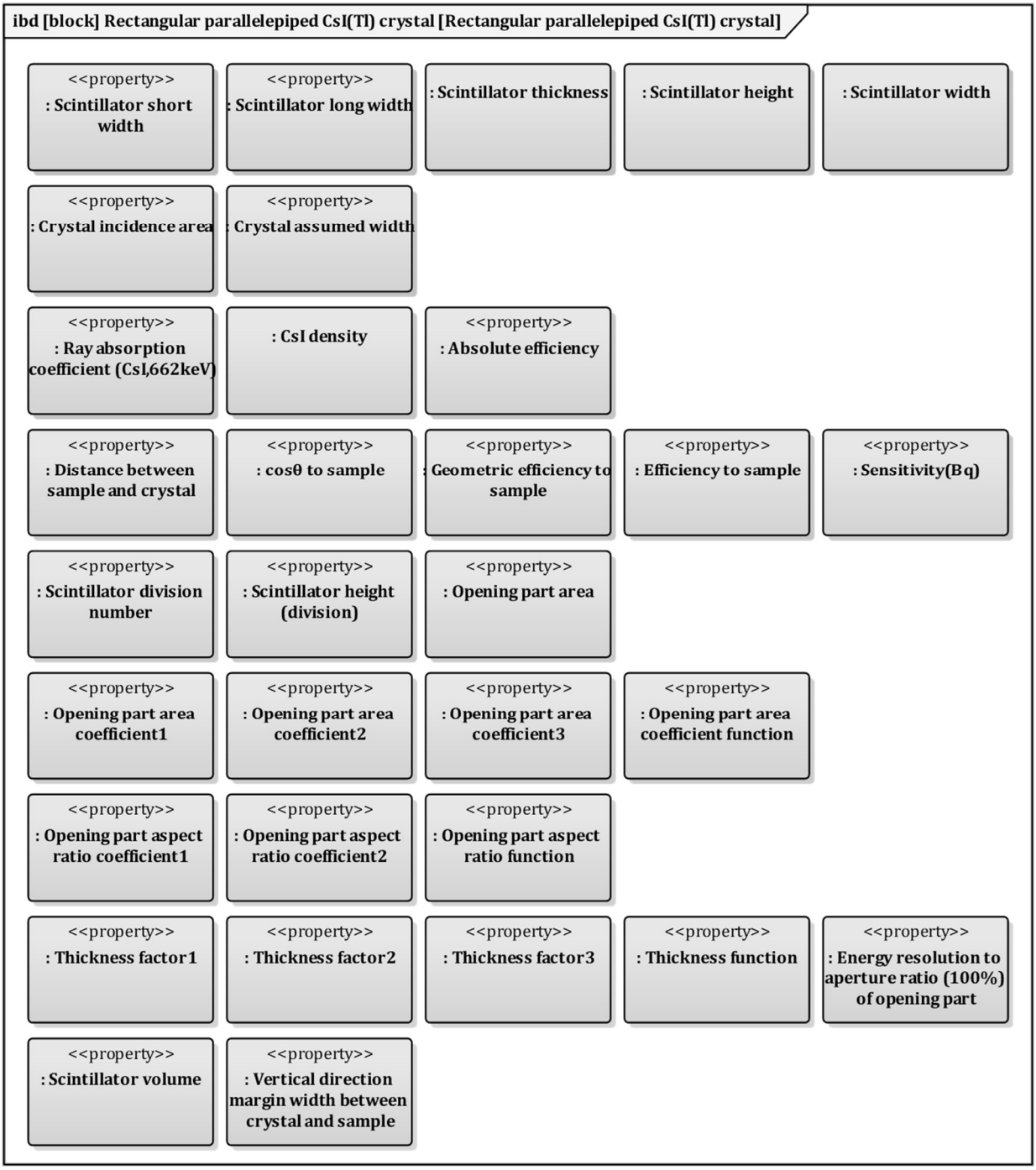


Fig. A.51 Result of assigning parameter to rectangular parallelepiped CsI(Tl) crystal.

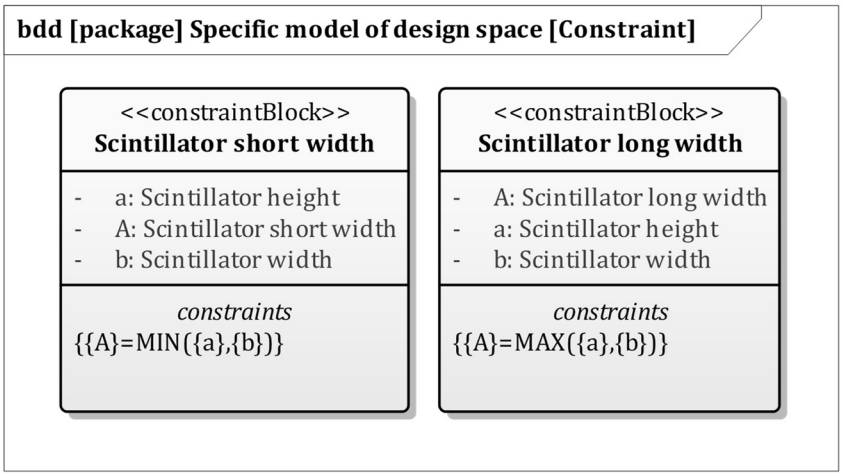


Fig. A.52 Description result of constraint relating to scintillator conditions.

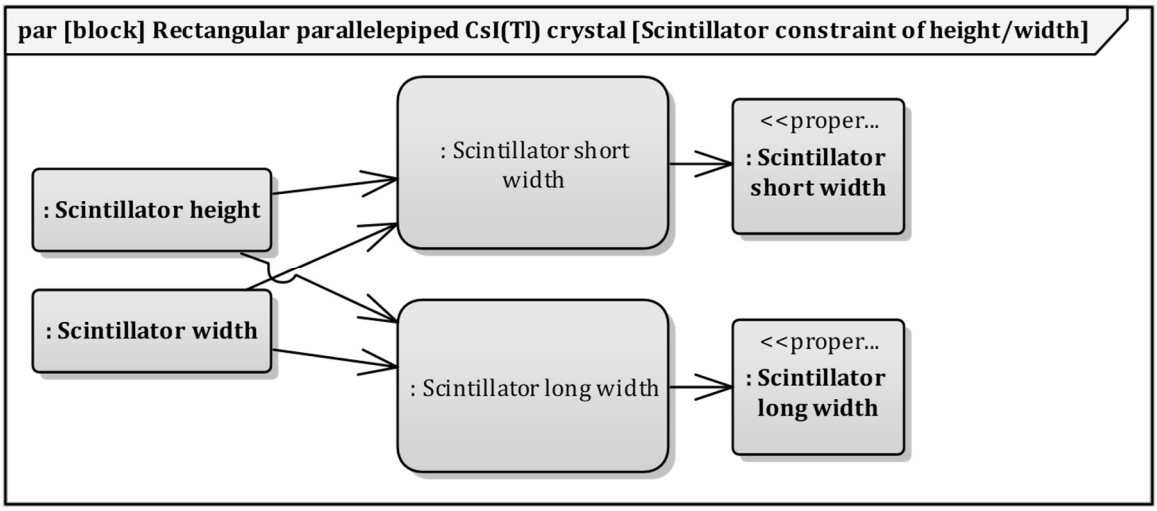


Fig. A.53 Description result of constraint relationship relating to scintillator conditions.

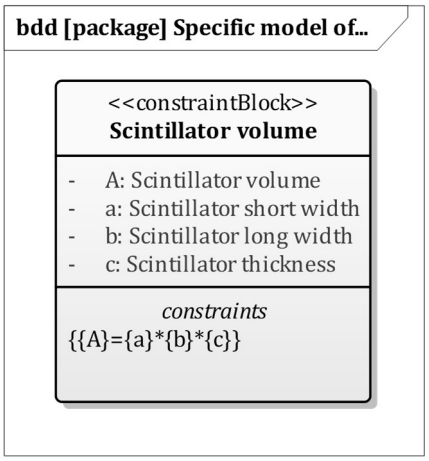


Fig. A.54 Description result of constraint relating to scintillator volume.

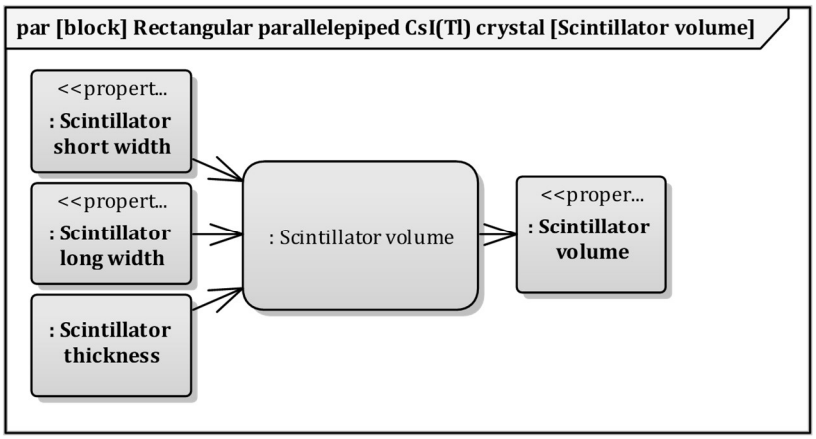


Fig. A.55 Description result of constraint relationship relating to scintillator volume.

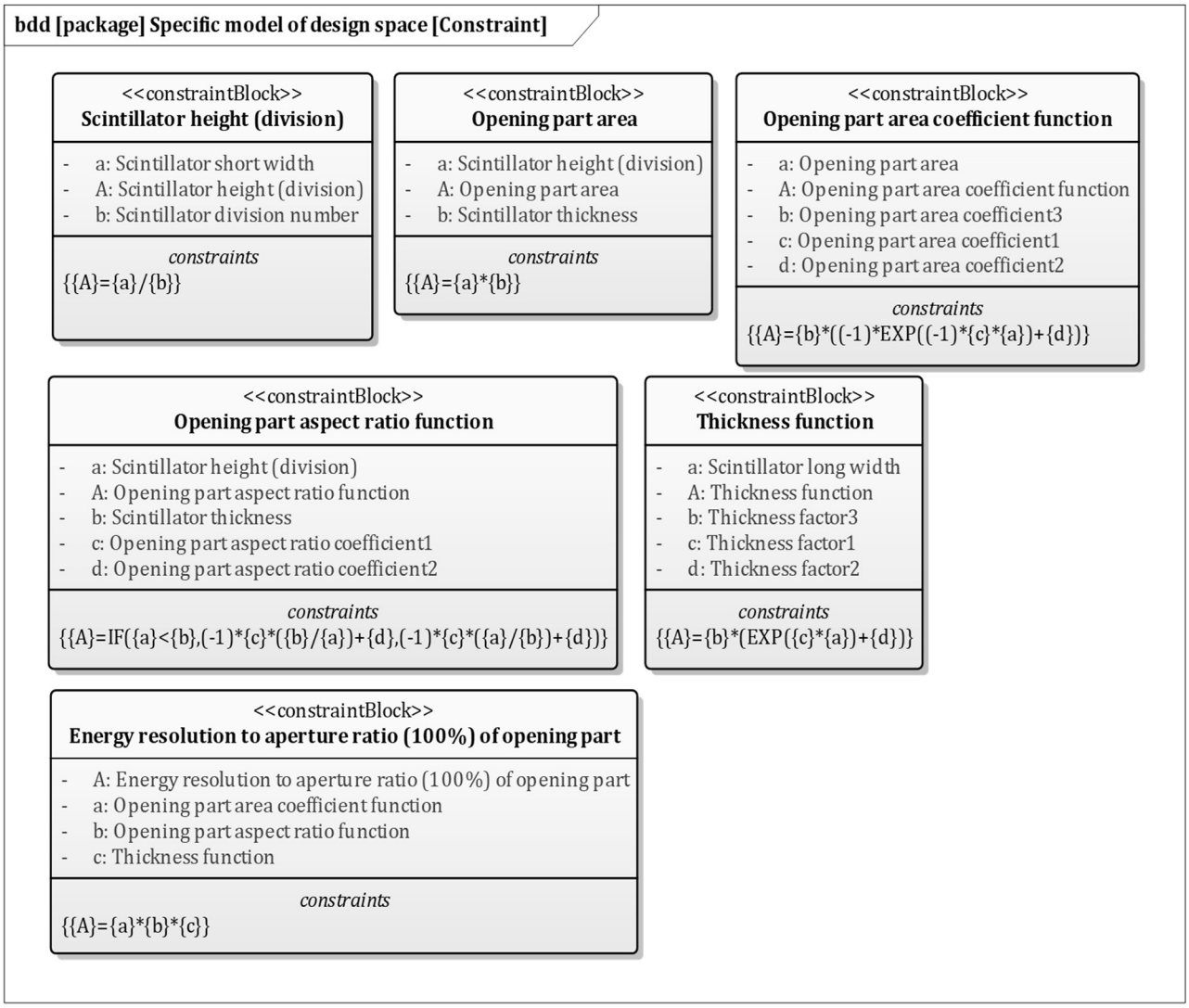


Fig. A.56 Description result of constraint relating to geometric energy resolution.

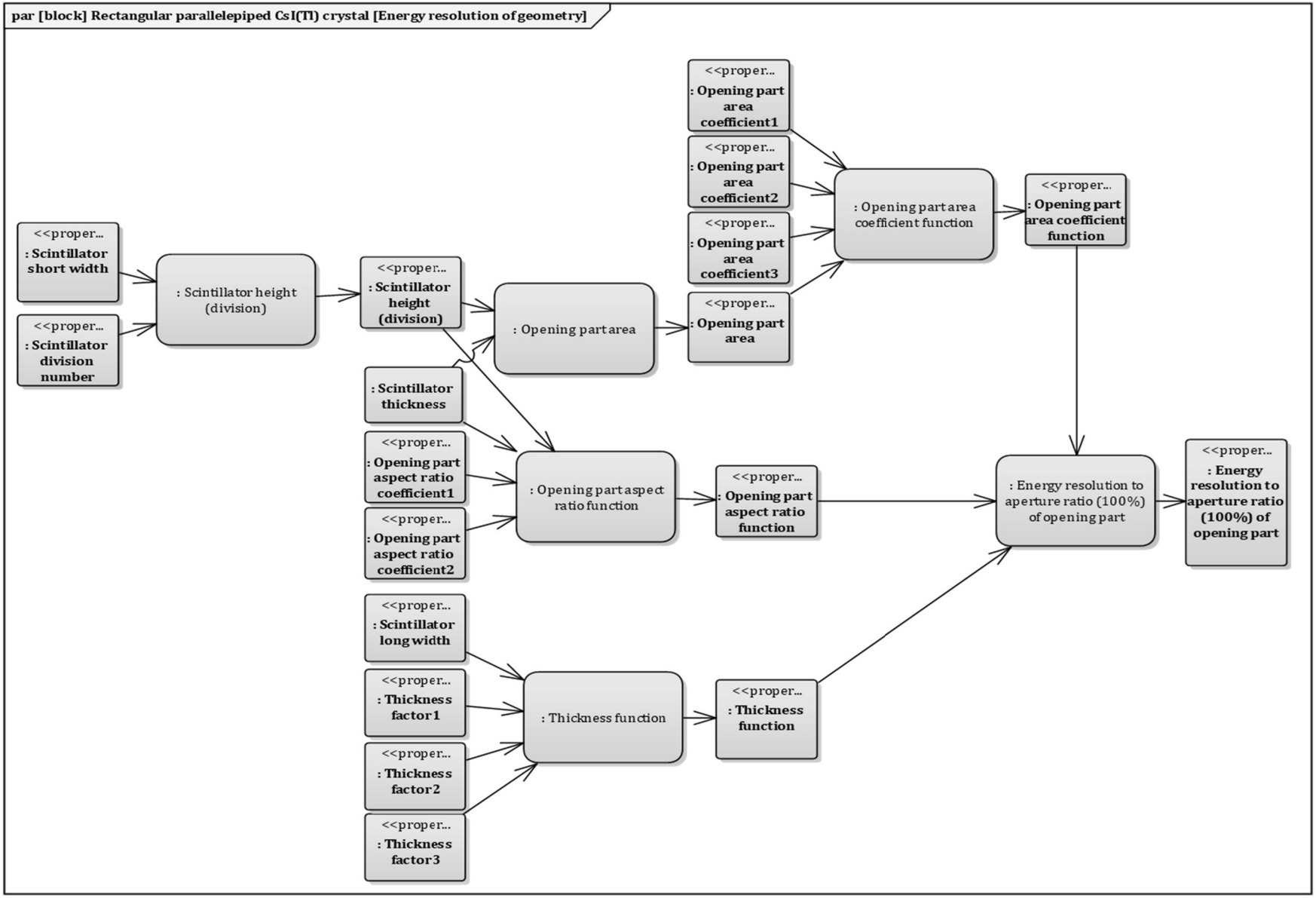


Fig. A.57 Description result of constraint relationship relating to geometric energy resolution.

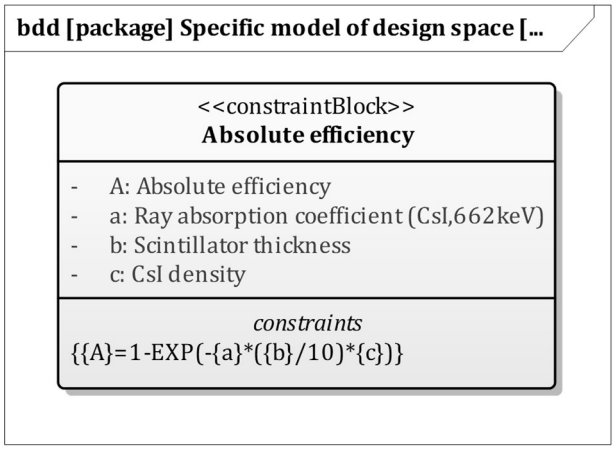


Fig. A.58　Description result of constraint relating to absolute efficiency.

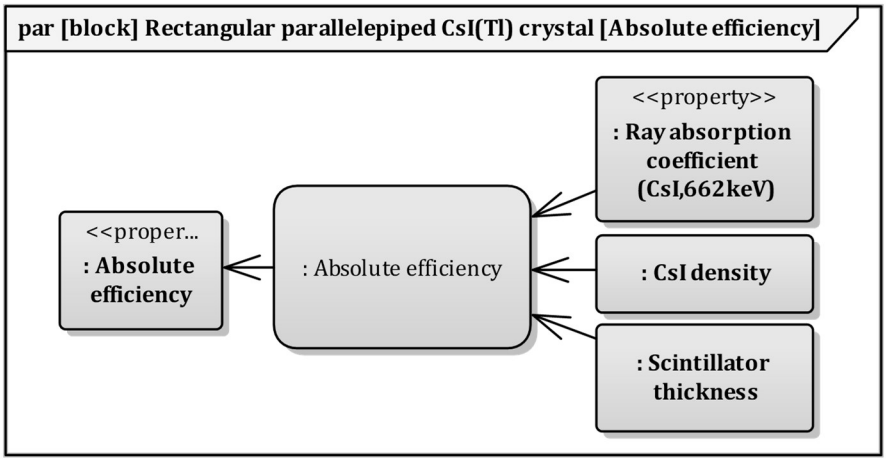


Fig. A.59　Description result of constraint relationship relating to absolute efficiency.

このように、具体的なシステム構造に関する制約関係をモデリングすることができた。

A.2.4　最適化問題のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した最適化設計を行うための、パラメータの情報、最適化問題の記述結果を述べる。4 章では、最適化問題の定義を示したので、ここでは、パラメータの記述結果を示す。ブロック定義図を用いて、製品システムモデルおよび設計空間固有モデルにて定義されたパラメータの型<<ValueType>>の全ての要素に対して、3 章で定義した<<Parameter>>というステレオタイプ要素で、パラメータの情報を記述する。記述結果を Fig. A.60～Fig. A.64 に分割して示す。

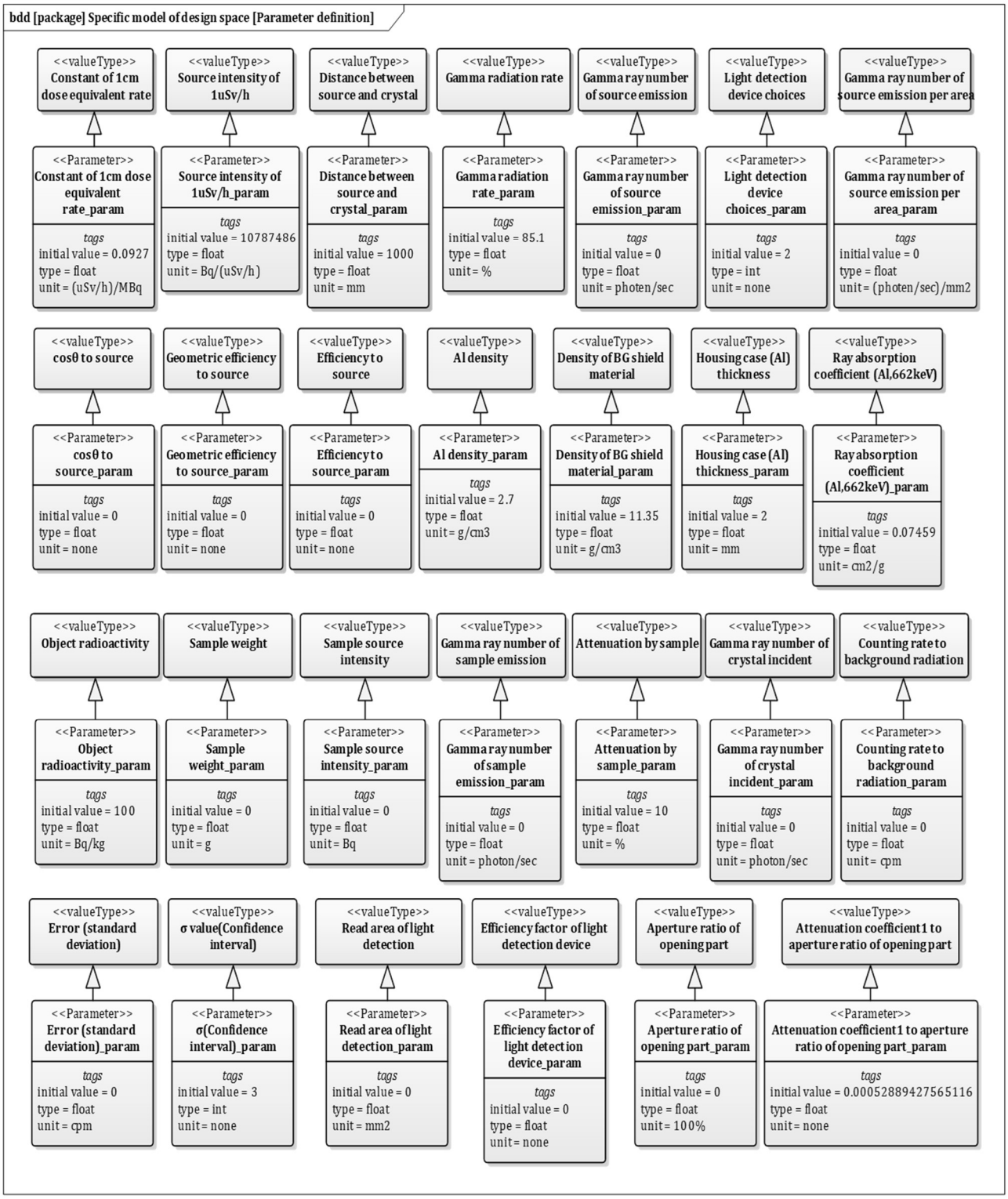


Fig. A.60 Description result of parameter definition (1/5).

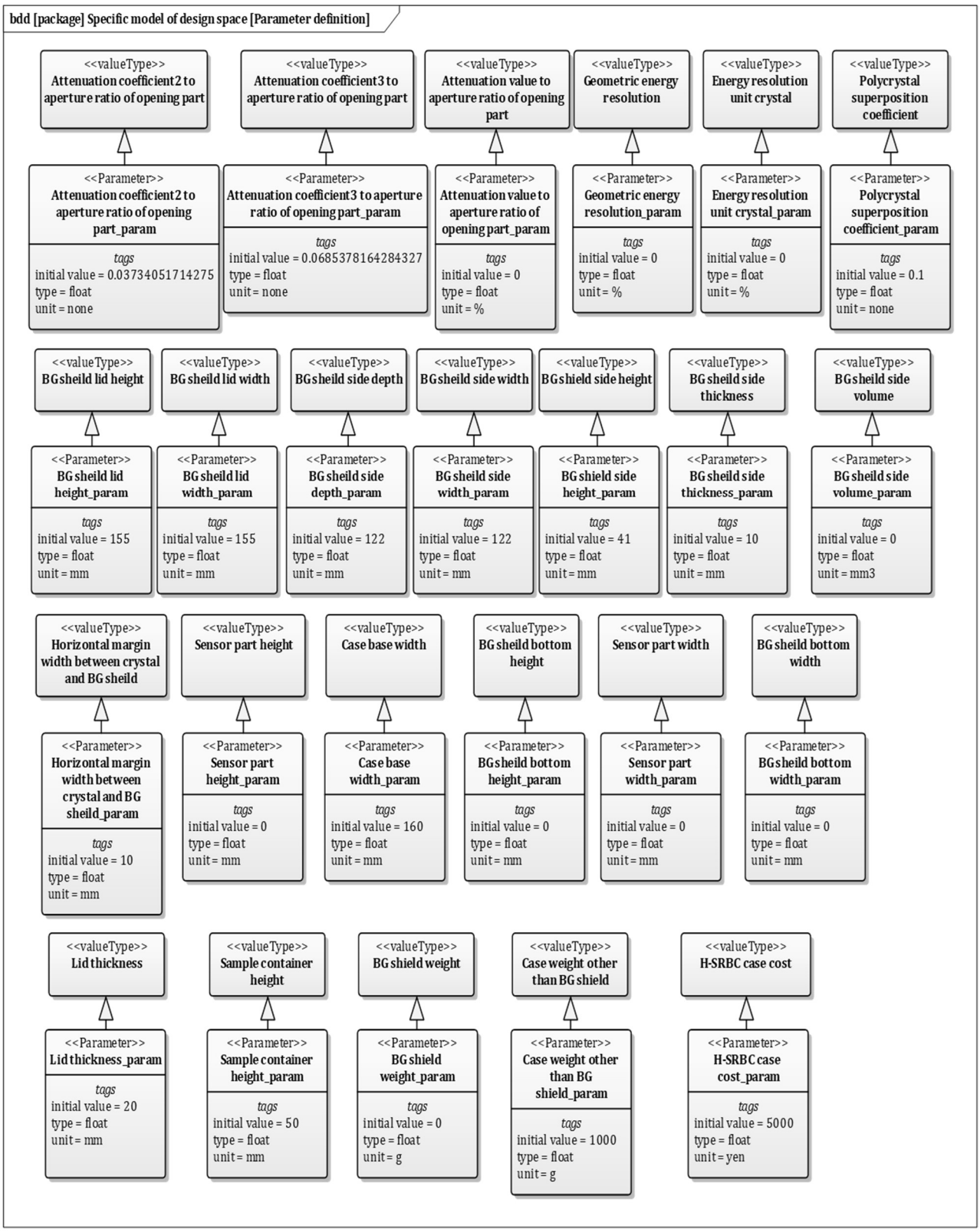


Fig. A.61 Description result of parameter definition (2/5).

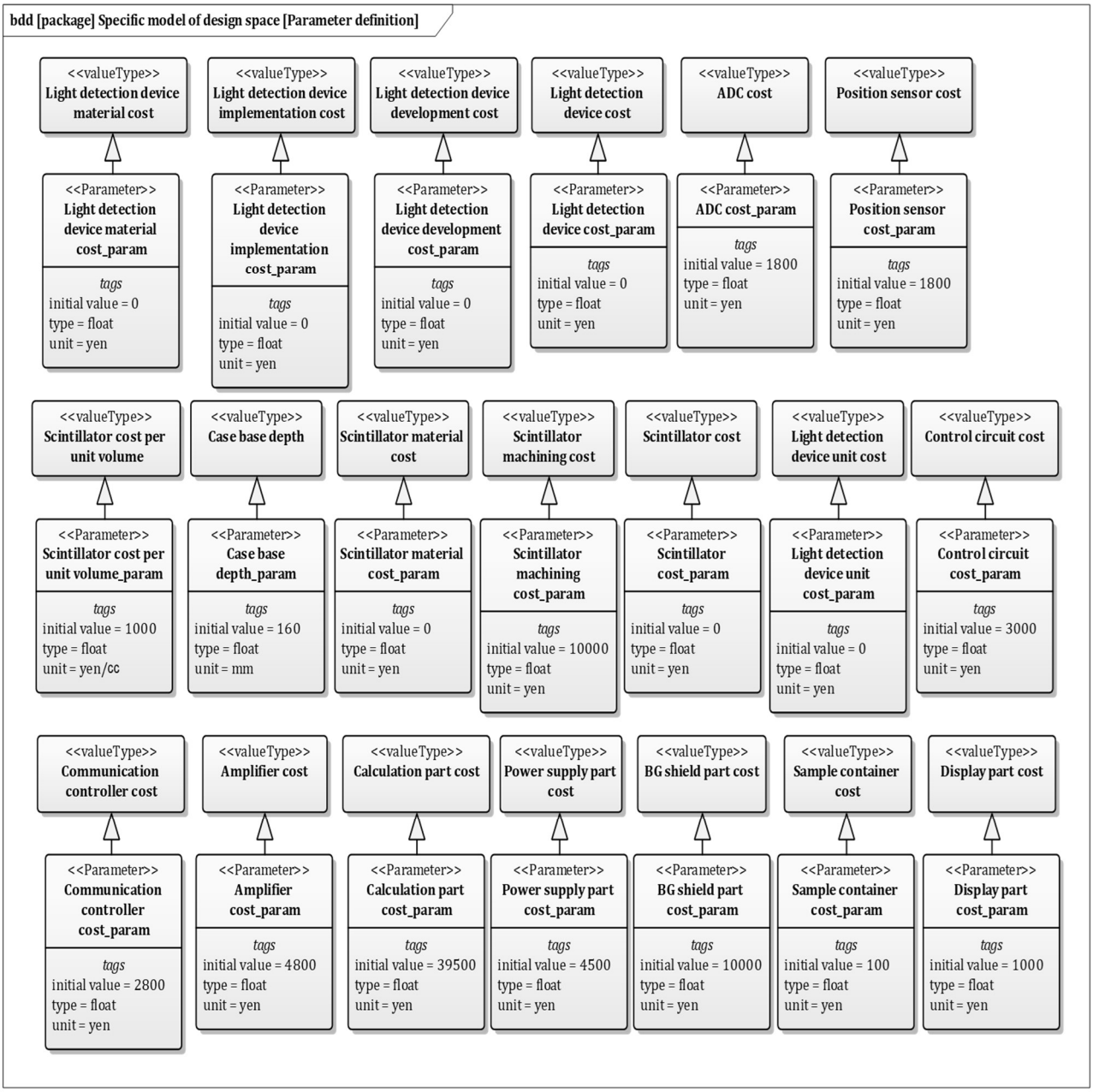


Fig. A.62 Description result of parameter definition (3/5).

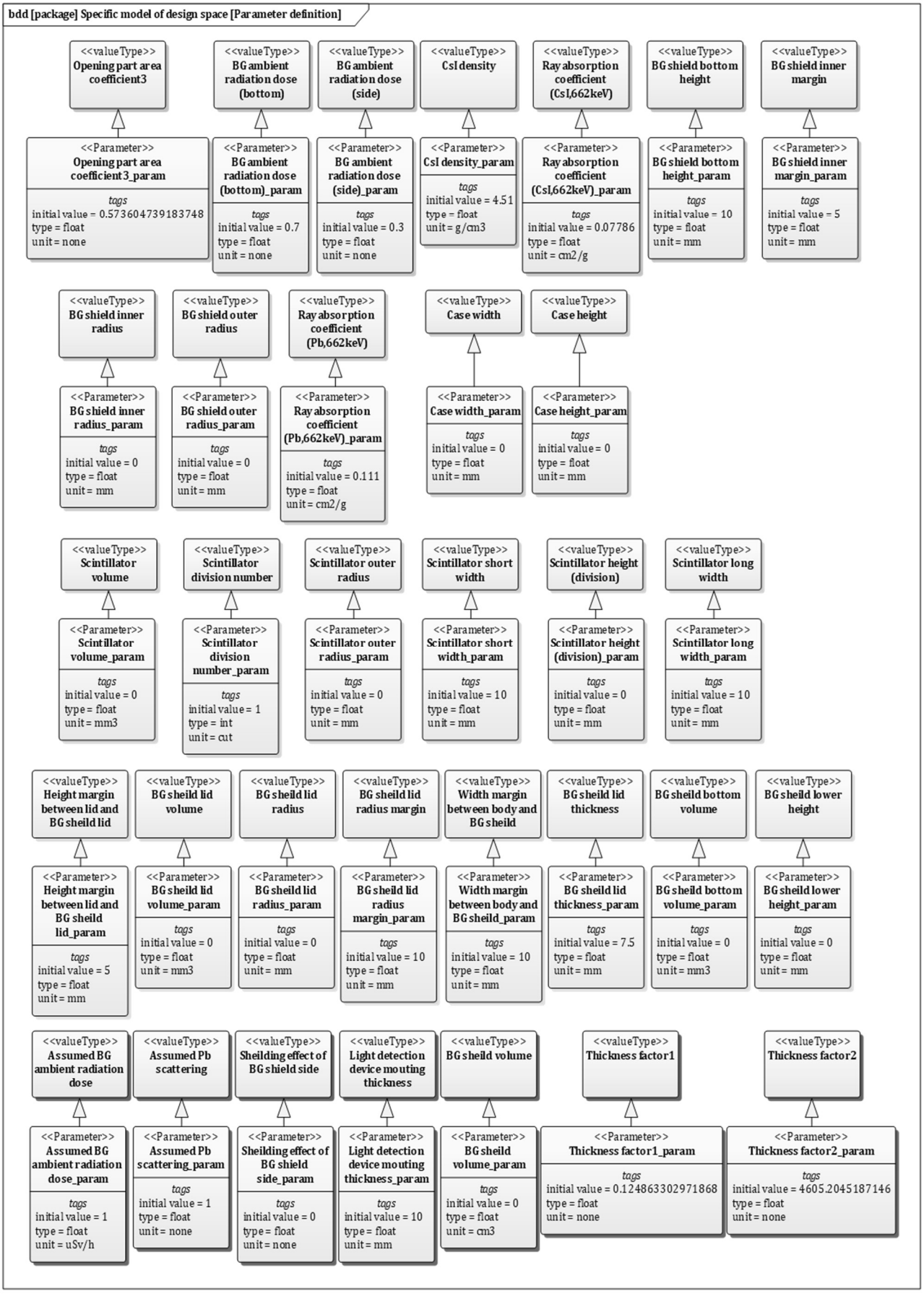


Fig. A.63 Description result of parameter definition (4/5).

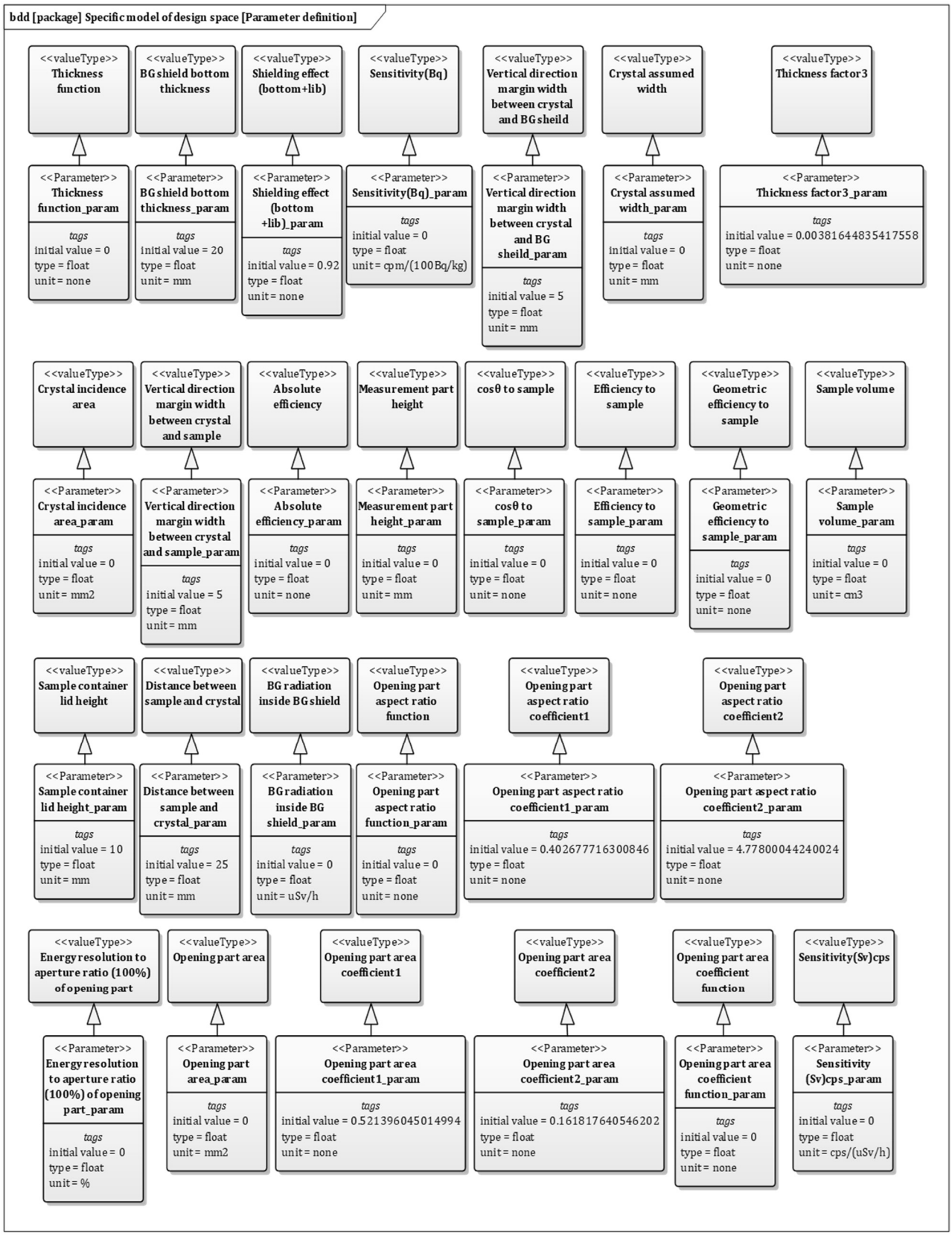


Fig. A.64 Description result of parameter definition (5/5).

このように、最適化設計を行うためのパラメータの情報を記述することができた。

A.3　設計ツール固有モデルのモデリング結果

A.3.1　CAD(Geant4)のためのシステム構造のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した設計空間固有モデルで記述したシステム構造に対するCAD(Geant4)用の構造の記述結果を述べる。ブロック定義図を用いて、Geant4 用の情報を記述するためのステレオタイプを用いた要素で記述を行う。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.65～Fig. A.72 に示す。Fig. A.65 は形状の回転を決めるための情報、Fig. A.66 は配置の母体となる実体に関する情報、Fig. A.67～Fig. A.72 は中空直方形 Al ハウジングケースの配置、物性、形状を決めるための情報を記述した結果を示している。

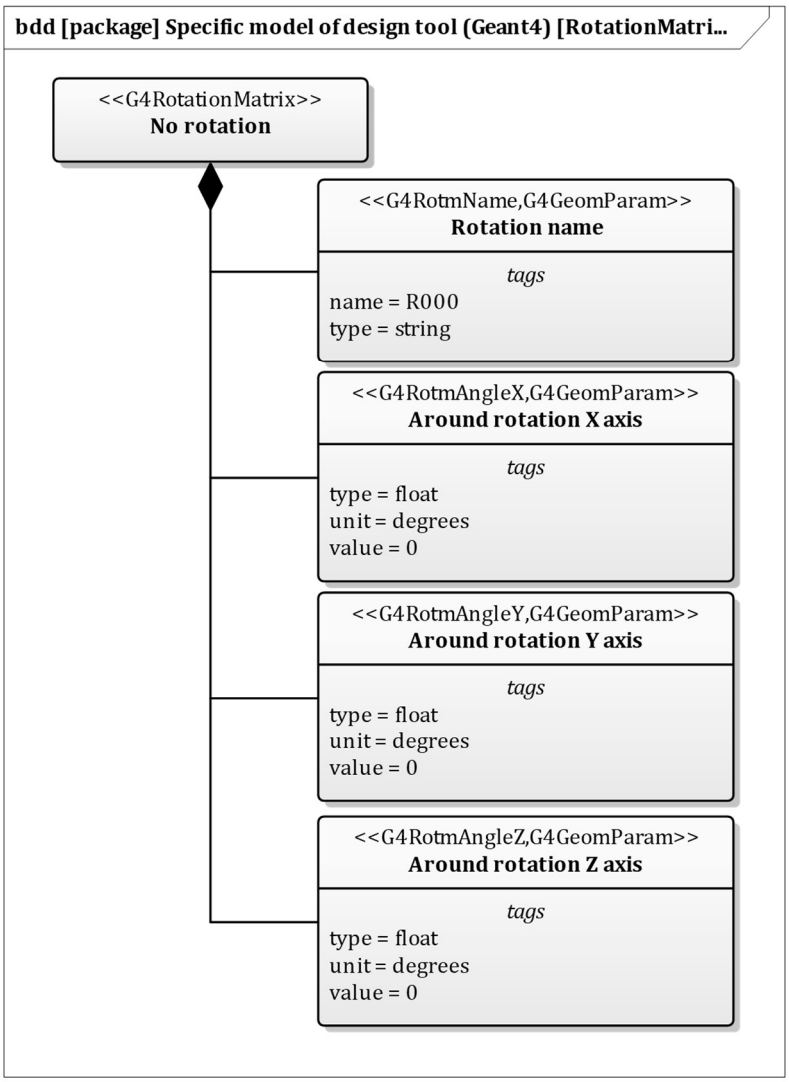


Fig. A.65　Description result of rotation information.

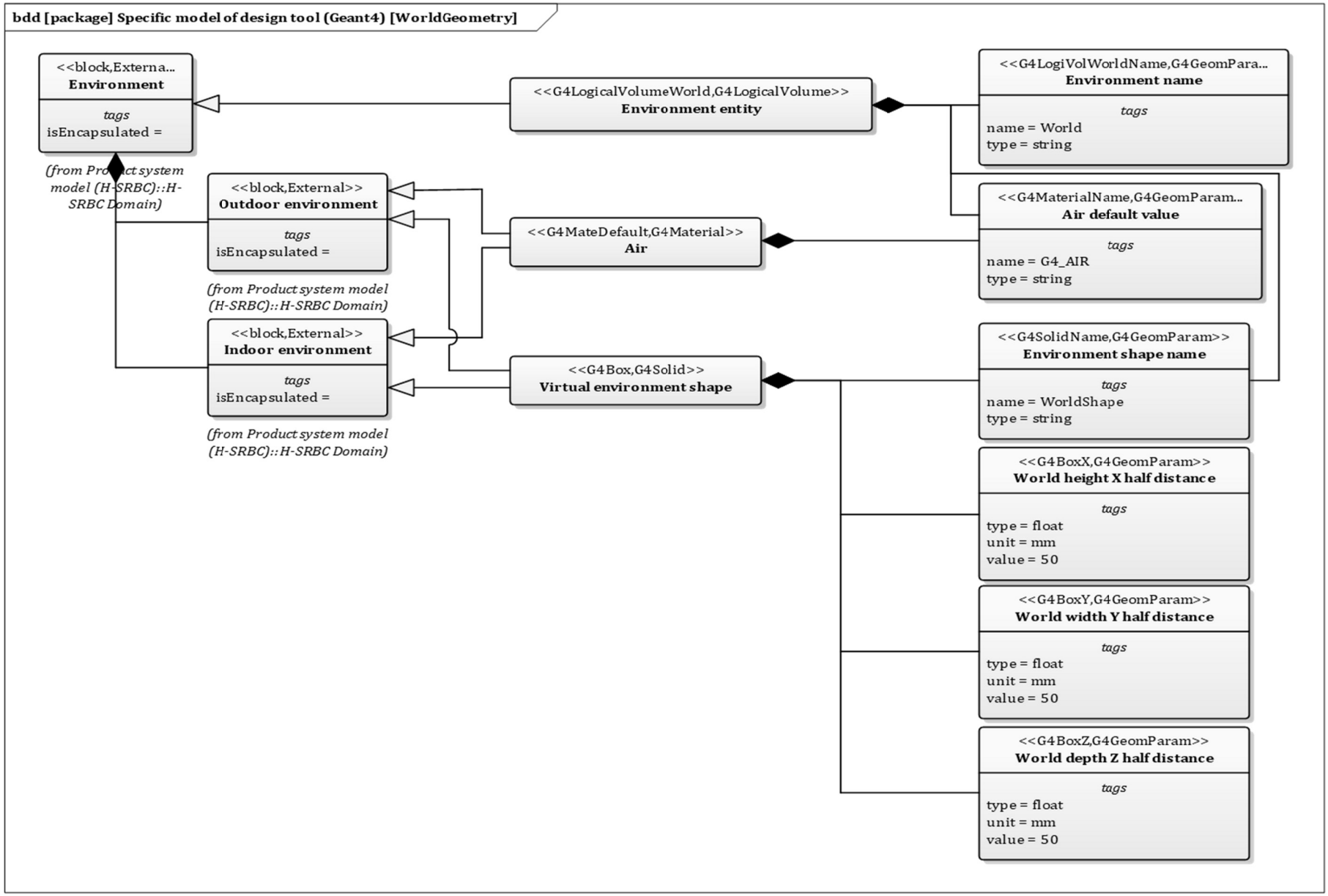


Fig. A.66 Description result of environment entity information.

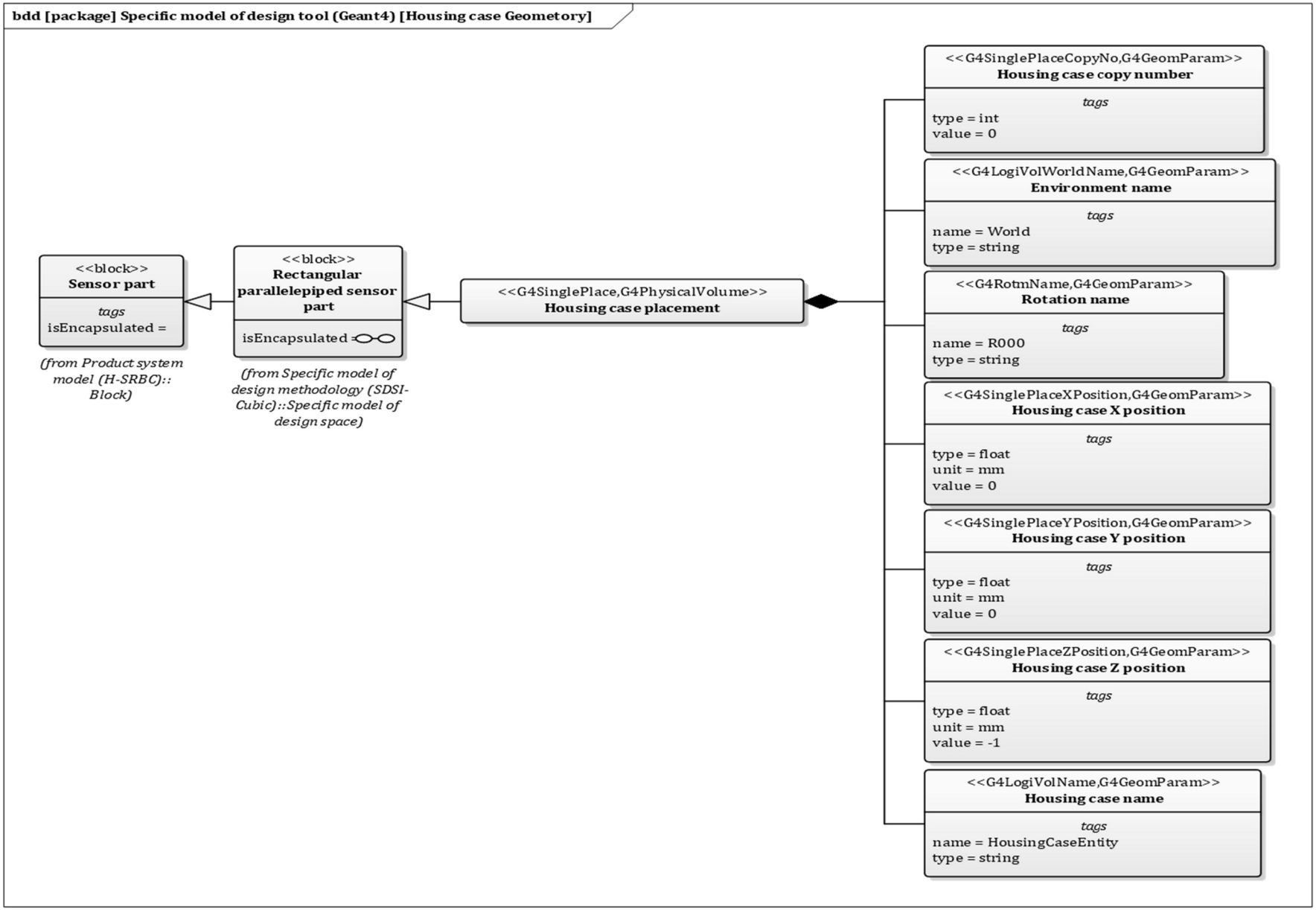


Fig. A.67 Description result of housing case placement information.

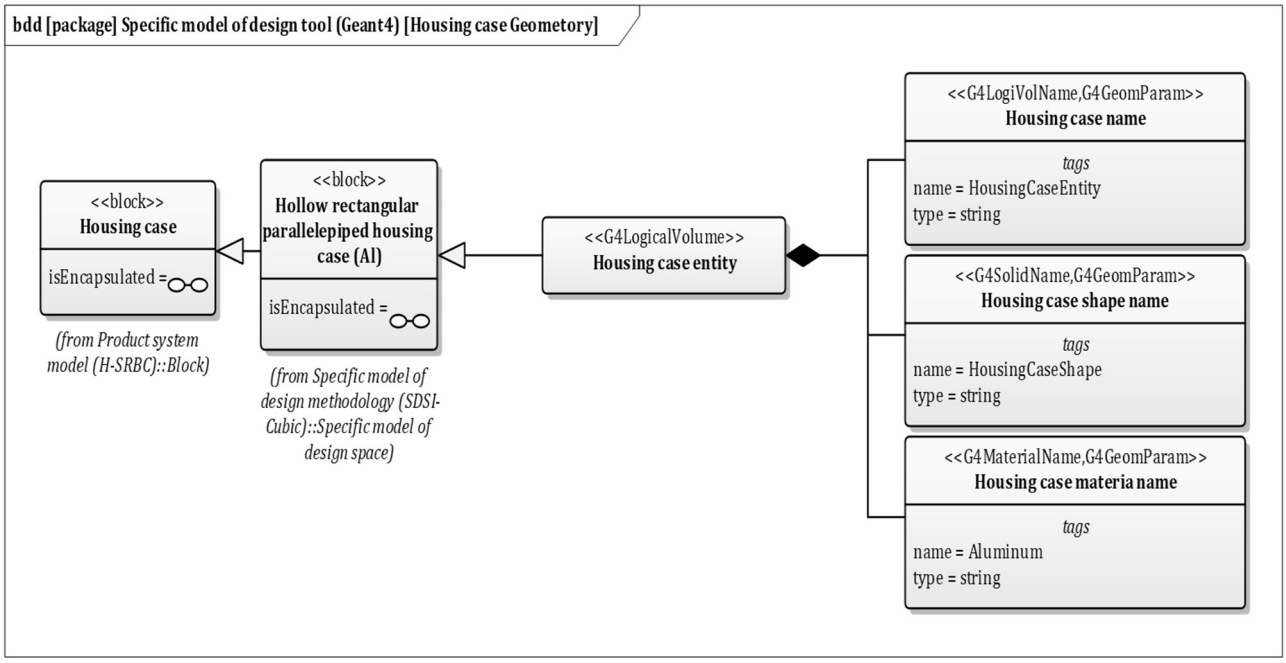


Fig. A.68 Description result of housing case entity information.

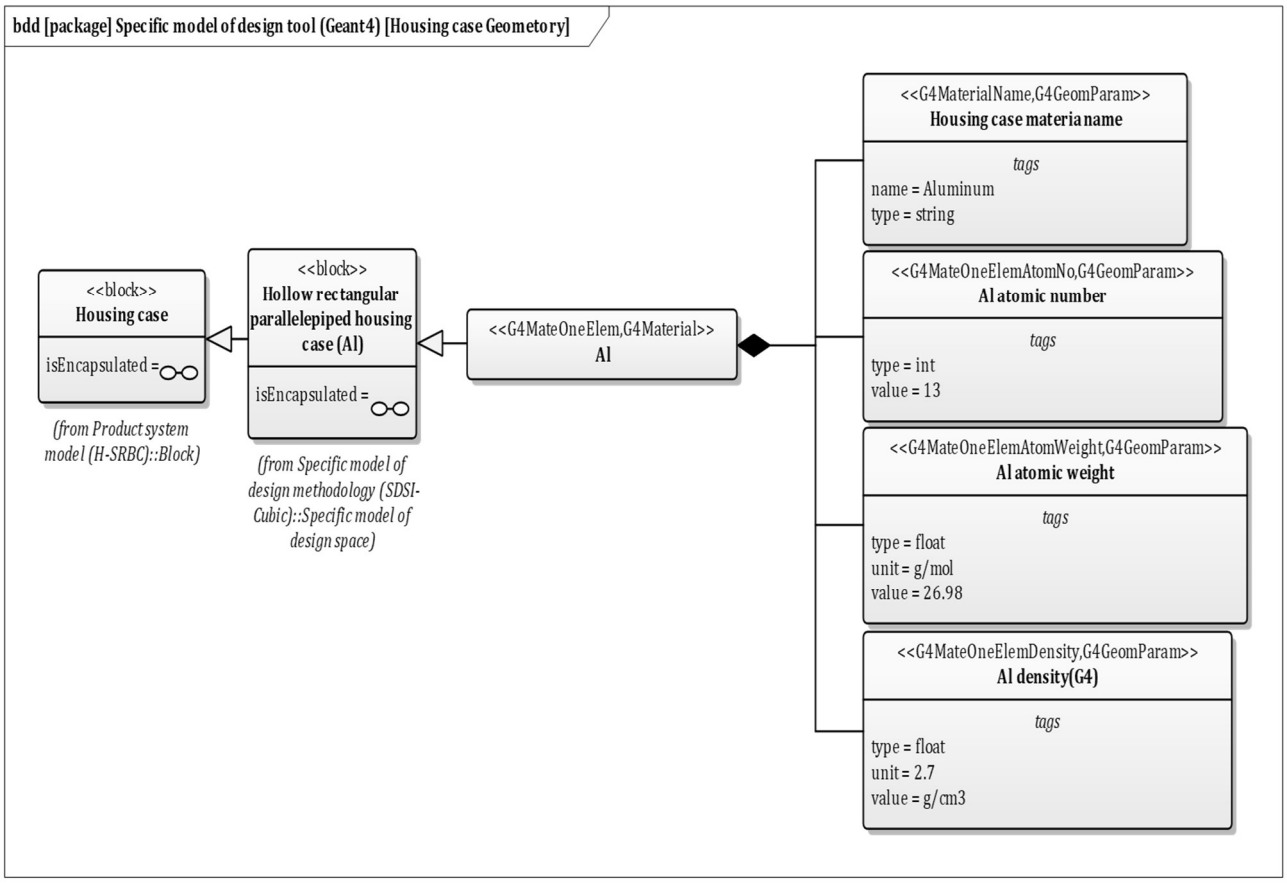


Fig. A.69 Description result of Al material information.

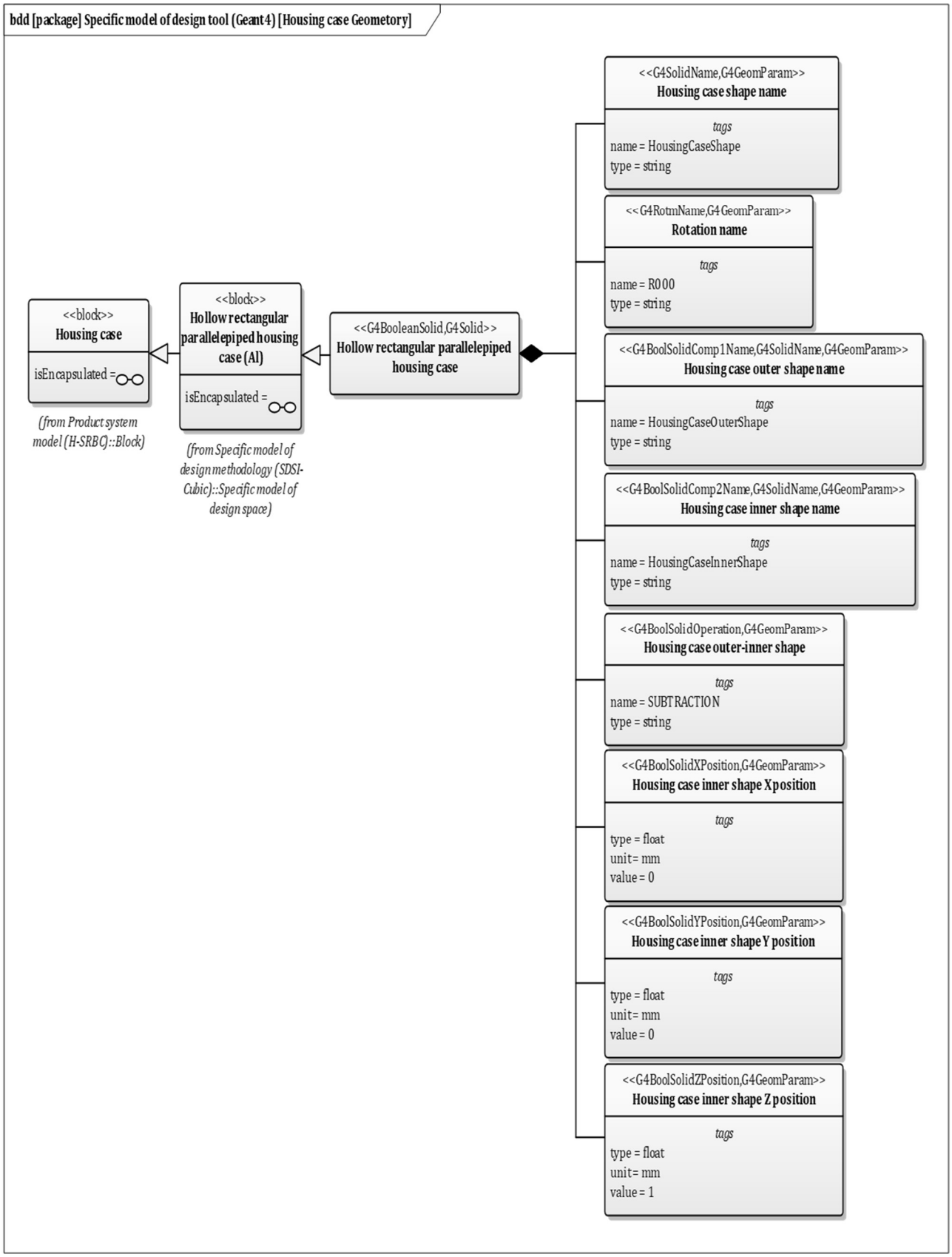


Fig. A.70 Description result of housing case shape information.

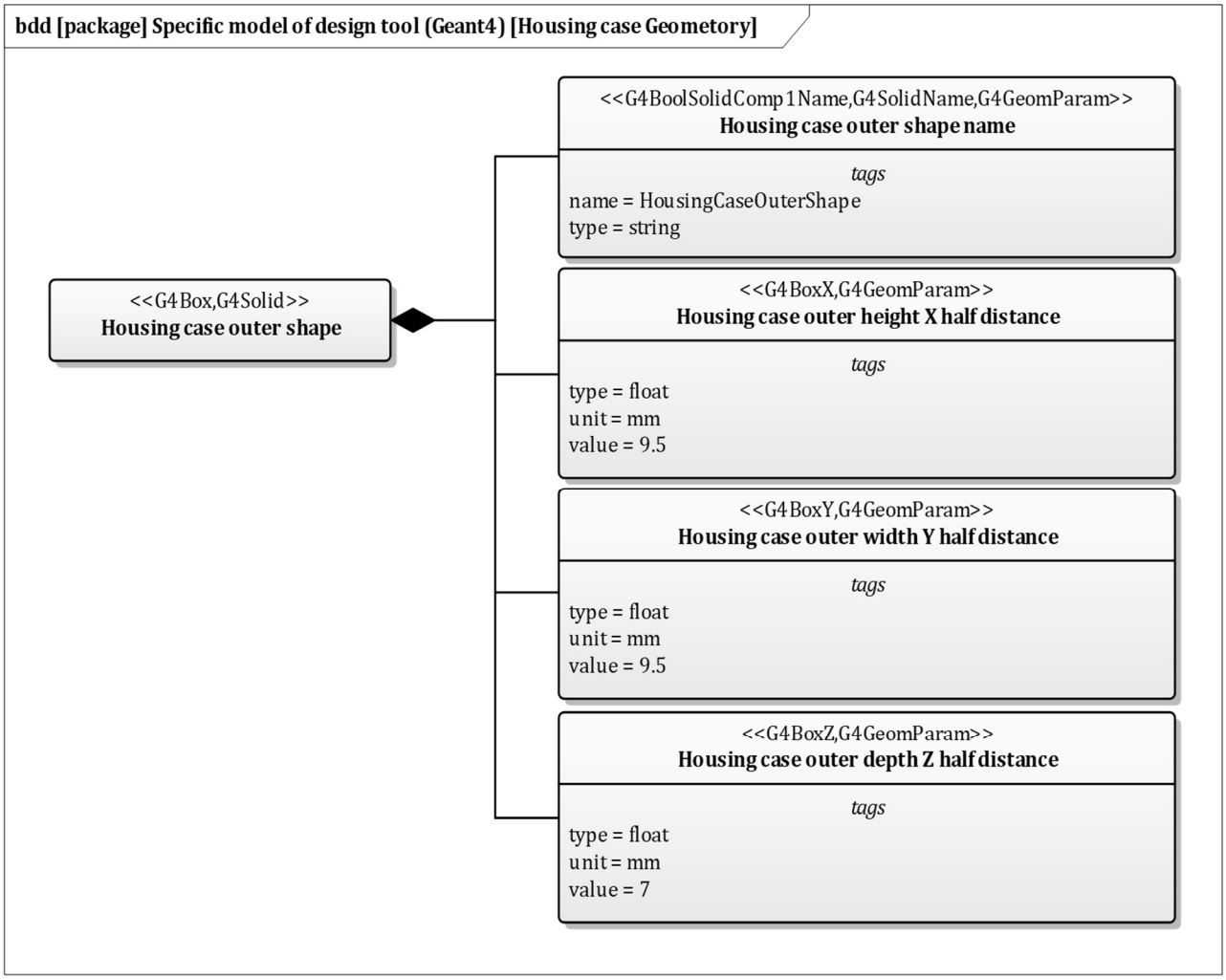


Fig. A.71 Description result of housing case outer shape information.

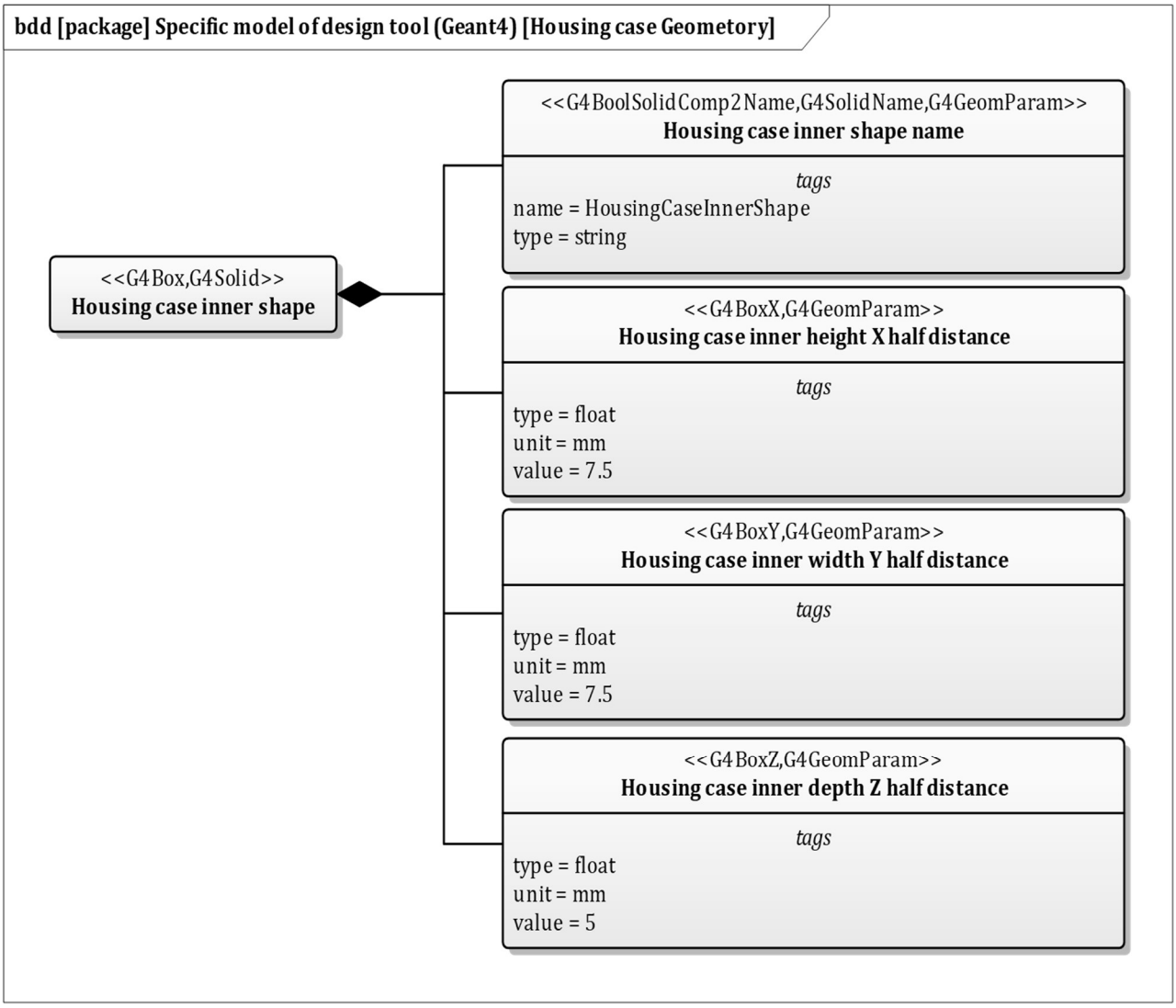


Fig. A.72　Description result of housing case inner shape information.

このように、CAD(Geant4)のためのシステム構造を記述することができた。

A.3.2　CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係のモデリング結果

ここでは、第 4 章で示した CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係の記述結果を述べる。この制約関係には、製品システムモデルおよび設計空間固有モデルとの間に生じる制約関係を含む。ブロック定義図で制約式を記述し、内部ブロック図でパラメータのシステム構造要素への割り当てを記述し、パラメトリック図で制約関係を可視的に記述する。4 章で述べた記述結果以外について、Fig. A.73～Fig. A.75 に示す。これらは中空直方形 Al ハウジングケースの幾何情報に必要なパラメータに関する制約関係を示しており、

シンチレータ結晶のパラメータや設計空間固有モデルのAl密度パラメータとの関係を記述している。

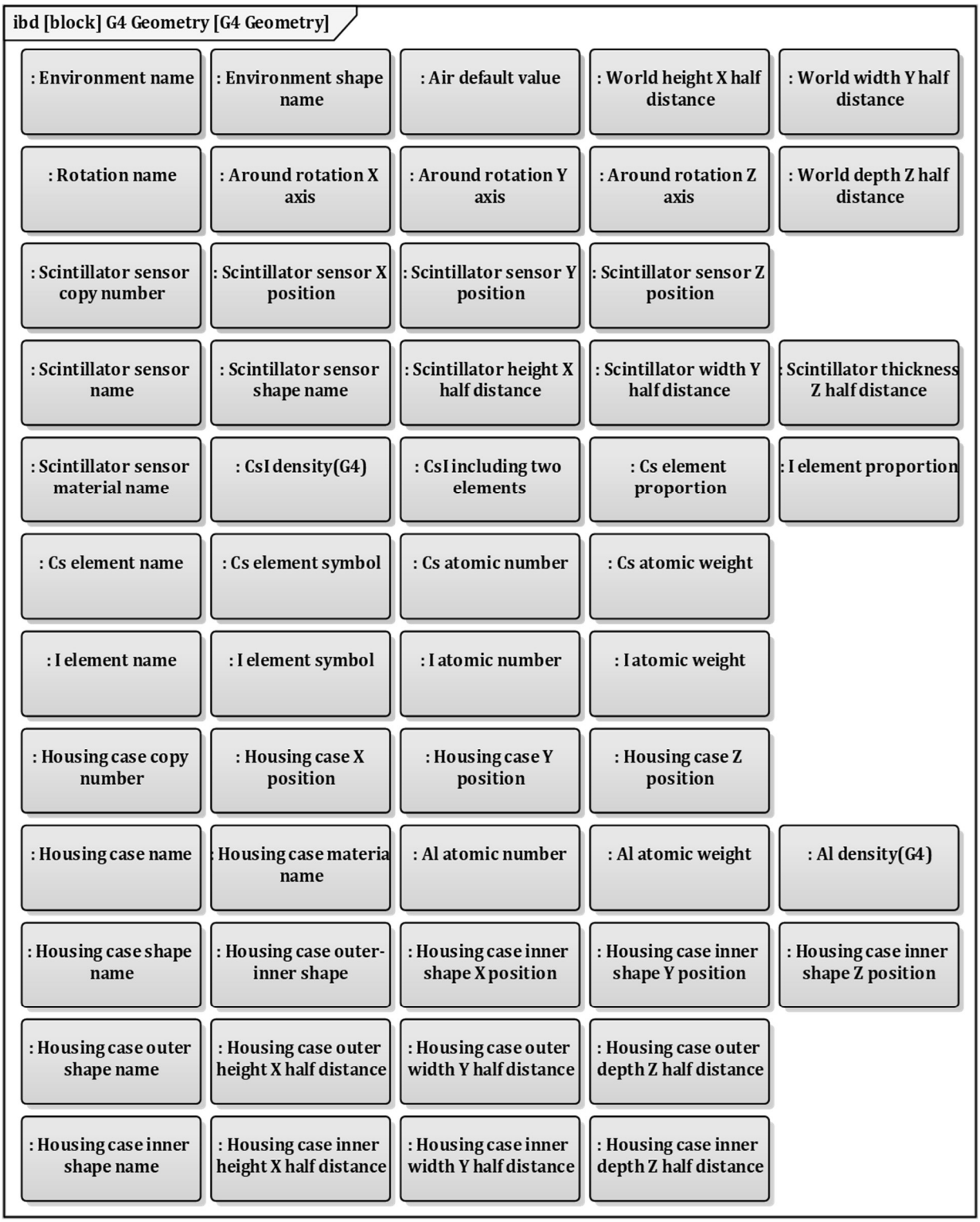


Fig. A.73　Result of assigning parameter to Geant4 structure.

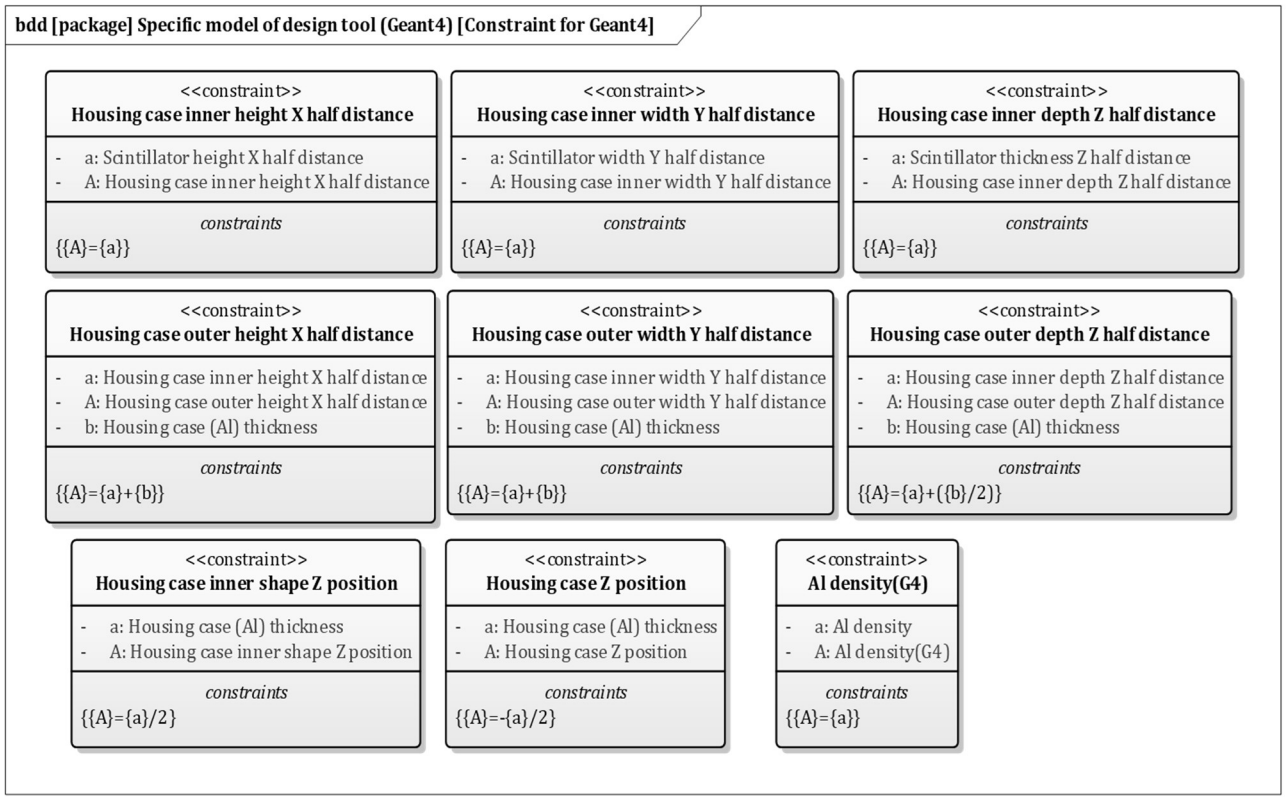


Fig. A.74 Description result of constraint relating to housing case geometry.

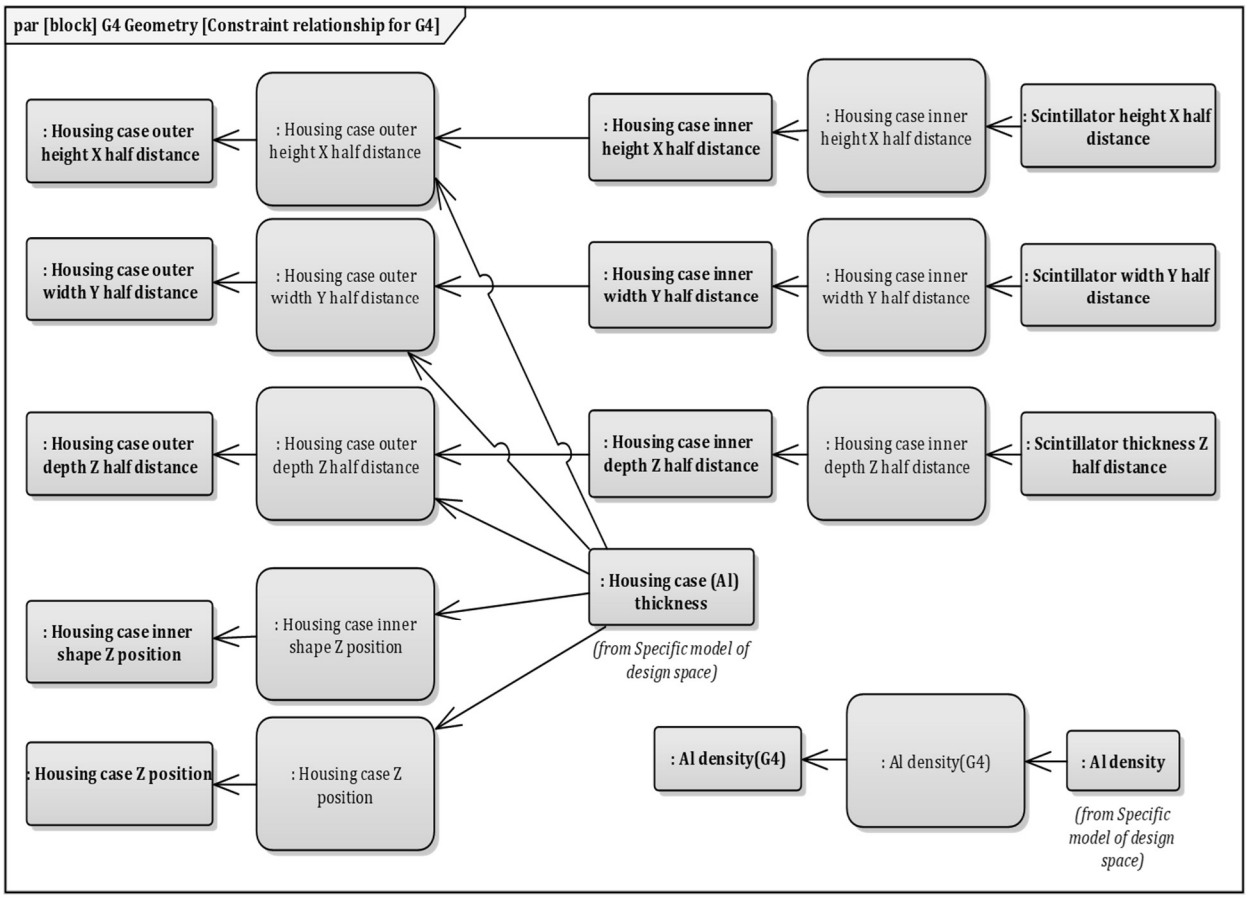


Fig. A.75 Description result of constraint relationship relating to housing case geometry.

このように、CAD(Geant4)のためのシステム構造に関する制約関係を記述することができた。

以上、放射線計測システムのシステムデザインにおいて、本モデリング手法を用いてモデルを記述した結果を示し、本モデリング手法が適用できることを確認した。

Ⅰ． 本論文に関する公表論文

(1) 河村憲，村田秀則，坂本武志，佐藤了平，岩田剛治，荒井栄司，岡本和也，“SDSI-Cubic 手法における製品システムモデリング手法の提案”，エレクトロニクス実装学会誌，21-2 (2018)，掲載予定.

(2) Shigekazu Nagai，Ken Kawamura，Yoshihide Kimura，Junji Yoshii，Renzo Ikeda，Ryuichi Shimizu，“An advanced ionizing radiation monitoring network based on using SrI_2(Eu)/MPPC module”，Surface and Interface Analysis，48-11 (2016) 1263-1268.

(3) Ken Kawamura，Hidenori Murata，Yoshiharu Iwata，Ryohei Satoh，Kazuya Okamoto，“Practical Optimization Flow using a New System Design Methodology”，Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging，8-1 (2015) 118-126.

(4) 永井滋一，河村憲，木村吉秀，志水隆一，吉井淳治，池田練造，竹内宣博，太田朗生，酒井昭宏，杉山誠，柳田由香，鈴木敏和，“Global Ionizing Radiation Monitoring Network の構築 – CsI(Tl)/PD から SrI_2(Eu)/MPPC へ -”，Journal of Surface Analysis，22-1 (2015) 21-30.

Ⅱ． 本論文に関する学会発表

(1) 村田秀則，河村憲，岩田剛治，佐藤了平，岡本和也，“物理および経済モデルの融合による 3 次元半導体の価値評価”，日本 MOT 学会　第 9 回年次研究発表会，(2018)，発表予定.

(2) 河村憲，佐藤了平，永井滋一，木村吉秀，櫻木史郎，志水隆一，“SrI_2(Eu)-シンチレータの G(E)関数の導出”，(独)日本学術振興会「マイクロビームアナリシス第 141 委員会」第 169 回研究会，(2017).

(3) Ken Kawamura，Yoshihide Kimura，Shigekazu Nagai，Yoshiyuki Kamakura，Junji Yoshii，Ryohei Satoh，Ryuichi Shimizu，Shiro Sakuragi，“Performance of Novel Module of SrI_2(Eu)-Scintillator of 1.5”φ × 1.5”high sandwiched between two Multi-Pixel Photon Counters for γ-ray spectroscopy”，10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices ’15，(2015).

(4) 河村憲，小林修士，岩田剛治，村田秀則，佐藤了平，“形状モデルを用いたシステムモデルと解析モデルの連携手法に関する基礎的検討”，日本機械学会　第 25 回設計工学・システム部門講演会，(2015).

(5) Ken Kawamura, Hidenori Murata, Yoshiharu Iwata, Ryohei Satoh, Takeshi Sakamoto, Kazuya Okamoto, “Practical optimization flow using a new system design methodology”, 2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference, (2015).

(6) Shigekazu Nagai, Ken Kawamura, Yoshihide Kimura, Junji Yoshii, Renzo Ikeda, Ryuichi Shimizu, “Development of New Global Ionizing Radiation Monitoring Network Using SrI_2(Eu)-scintillator and Multi-pixel Photon Counter for Gamma-ray Spectroscopy”, 10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices ’15, (2015).

(7) 永井滋一，河村憲，木村吉秀，吉井淳治，池田練造，志水隆一，“SrI_2/MPPC を用いた Global Ionizing Radiation Monitoring Network の展開”，第 76 回応用物理学会秋季学術講演会，(2015).

(8) 永井滋一，河村憲，木村吉秀，志水隆一，吉井淳治，池田練造，竹内宣博，太田朗生，酒井昭宏，杉山誠，柳田由香，鈴木敏和，“新しい Global Ionizing Radiation Monitoring Network の展開[I] −SrI_2/MPPC の性能評価−”，(独)日本学術振興会「マイクロビームアナリシス第 141 委員会」第 160 回研究会，(2015).

(9) Junji Yoshii, Shigekazu Nagai, Ken Kawamura, Yoshihide Kimura, Renzo Ikeda, Ryuichi Shimizu, Nobuhiro Takeuchi, Akio Ohta, Akihiro Sakai, Makoto Sugiyama, Toshikazu Suzuki, “Global Ionizing Radiation Monitoring Network based on the use of SrI_2(Eu)/MPPC for γ-ray Spectroscopy”, The 10th International Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation, (2015).

(10) Junji Yosii, Shigekazu Nagai, Ken Kawamura, Yoshihide Kimura, Renzo Ikeda, Ryuichi Shimizu, Nobuhiro Takeuchi, Akio Ohta, Akihiro Sakai, Makoto Sugiyama, Yuka Yanagida, Toshikazu Suzuki, “Global Ionizing Radiation Monitoring Network [II] SrI_2(Eu)-scintillator for γ-ray Spectroscopy”, The 10th International Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation, (2015).

(11) Hideji Yumen, Goken Hino, Shigeo Okubo, Daigo Koyanagi, Ken Kawamura, Yoshihide Kimura, Ryuichi Shimizu, “A Portable Becquerel Counter for Home Use”, The 10th International Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation, (2015).

(12) 河村憲，岩田剛治，村田秀則，佐藤了平，坂本武志，“システムの形状と非機能要求

のモデル化に関する基礎的検討”，日本機械学会　第 24 回設計工学・システム部門講演会，(2014).

(13) 折田真紀子，高村昇，遊免秀二，大久保茂夫，日野剛健，木村吉秀，河村憲，志水隆一，“Portable Smart Becquerel Counter の開発[I] - 検量線の構築”，(独)日本学術振興会「マイクロビームアナリシス第 141 委員会」第 158 回研究会，(2014).

(14) Ken Kawamura，Touma Matsusima，Akie Kikuchi，Hidenori Murata，Yoshiharu Iwata，Ryohei Satoh，“Applying new system design method (SDSI-Cubic) to a design of Handy Smart Becquerel Counter”，The 7th Asia-Pacific Council on Systems Engineering Conference，(2013).

(15) Hideji Yumen, Shigeo Okubo, Ken Kawamura, Yoshihide Kimura, Isao Murata, Renzo Ikeda, Kyoshiro Imagawa，Kensuke Yasuda，Ryohei Sato，Ryuichi Shimizu，“A Smart Becquerel Counter for On-site Inspection”The 9th International Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation，(2013).

(16) Kensuke Yasuda，Kyoshiro Imagawa，Ken Kawamura，Yuichiro Manabe，Shigeo Okubo，Syuuji Yuumen，Ryohei Sato，Ryuichi Shimizu，“Optimization of CsI(Tl)-Scintillation detector for Ionizing Radiation Monitor - Experimental and Theoretical Approaches –”，The 9th International Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation，(2013).

(17) Hideji Yuumen，Shigeo Okubo，Ken Kawamura，Yuichiro Manabe，Yoshihide Kimura，Isao Murata，Renzo Ikeda，Kyoshiro Imagawa，Kensuke Yasuda，Ryohei Sato，Ryuichi Shimizu，“A Mobile Smart Becquerel Counter for On-site Inspection”，The 8th International Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation，(2012).

(18) 吉井淳治，池田練造，木村吉秀，河村憲，真鍋勇一郎，佐藤了平，永井滋一，大久保茂夫，志水隆一，“Smart Becquerel Counter のソフトウエア・プラットフォーム”，(独)日本学術振興会「マイクロビームアナリシス第 141 委員会」第 149 回研究会，(2012).