



Title	深部臓器がんの陽子線治療における照射部位の照準・確認システム
Author(s)	辻井, 博彦; 稲田, 哲雄; 丸橋, 晃 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1989, 49(5), p. 622-629
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/15810">https://hdl.handle.net/11094/15810</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

## 深部臓器がんの陽子線治療における 照射部位の照準・確認システム

筑波大学粒子線医科学センター<sup>1</sup>

筑波大学臨床医学系<sup>2</sup>

筑波大学基礎医学系<sup>3</sup>

辻井 博彦<sup>1,2</sup> 稲田 哲雄<sup>1,3</sup> 丸橋 晃<sup>1,3</sup> 早川 吉則<sup>1,3</sup>  
辻 比古志<sup>1,2</sup> 大原 潔<sup>2</sup> 秋貞 雅祥<sup>2</sup> 北川 俊夫<sup>1,2</sup>

（平成元年3月2日受付特別掲載）

（平成元年3月20日最終原稿受付）

## Field Localization and Verification System for Proton Beam Radiotherapy in Deep-Seated Tumors

Hirohiko Tsujii<sup>1,2</sup>, Tetsuo Inada<sup>1,3</sup>, Akira Maruhashi<sup>1,3</sup>, Yoshinori Hayakawa<sup>1,3</sup>,  
Hiroshi Tsuji<sup>1,2</sup>, Kiyoshi Ohara<sup>2</sup>, Masayoshi Akisada<sup>2</sup>  
and Toshio Kitagawa<sup>1,2</sup>

1) Particle Radiation Medical Science Center, University of Tsukuba

2) Institute of Clinical Medical Sciences, University of Tsukuba

3) Institute of Basic Medical Sciences, University of Tsukuba

---

Research Code No. : 208.1, 601.2

---

Key Words : Proton radiotherapy, X-ray image processing,  
Localization, Verification

---

It has been recognized that, for precise localization and verification of radiation fields, a marking drawn on the skin surface is not entirely reliable because its position relative to bony structures or internal organs is not stationary. This is especially true when treating deep-seated tumors located below the clavicle. In proton beam radiotherapy at the University of Tsukuba, we restrict the margins around the target volume. Therefore, special care in field localization and verification is needed, and we make it a rule to take X-ray pictures on each treatment day. To accomplish this, we have developed a localize-and-verify system by using fluoroscopic techniques and combining it with a real-time digital image processing device. This allows for the formation of a digital image of the proton field and storage it in the optic disc. By using this system as well as verification films, field placement errors were measured in 10 patients with deep-seated tumors. Out of a total of 190 localizations, 22% exhibited a field placement error of more than 5 mm, where patient positioning and field localization were done by using skin drawings aligned with laser beams. This result strongly suggests the necessity for daily localization and verification of radiation fields, as is being done by us, for precision in the execution of proton beam radiation therapy.

### はじめに

---

\*：商品名：Image Σ-II, 日本アビオニクス株式会社,  
東京

高エネルギー陽子線の最大の魅力は体内でシャープなブラッグ・ピークを形成することで、その

幅と深さを調節することにより、病巣の形状にあわせた選択的照射が可能である<sup>1)2)</sup>。この特徴は特に、病巣が比較的小さく、すぐ横に放射線感受性の高い正常臓器が存在するような場合に威力を発揮する。病巣の選択的照射が容易であるため、放射線抵抗性癌に対しても、X線やガンマ線を用いるときよりも安全に高線量照射が可能となり、そのぶんだけ局所制御率の向上が期待できる<sup>3)~5)</sup>。

陽子線治療において線量分布上の利点を生かすためには、病巣周囲に必要最少限の安全率を含んだ標的容積を設定するのが原則となるが、それだけとくに厳密な照射精度が要求され、今迄になかったような努力と工夫が必要になる。なかでも、病巣進展範囲の把握、患者体位の再現性、照射部位の照準・確認などは重要で、これらの精度如何で治療結果が大きく左右される。

本研究では、陽子線による選択的照射を行なう上で必要とされる臨床技術として、体深部病巣の正確な照準法とともに、照射部位の照準・確認システムを開発したので、その結果を報告する。

### I. 陽子線治療計画

陽子線治療計画は、CT情報をもとに、われわれが独自に開発した線量計算コンピュータシステム(VAX 11/750を中心とした電算機システム)を用いて行われる<sup>6)7)</sup>。以下、主な作業手順について概要を述べる。

陽子線治療計画には、病巣部を5~10mm間隔で撮影したX線CT画像が用いられる。これは磁気テープを介して線量計算コンピュータに入れられるが、まず、CT像上で体輪郭の自動抽出が行なわれる。ついで、治療医によりトラックボールで標的輪郭が入力され、陽子線ビームの入射方向が決定されると、入射方向に沿って標的を通過するライン上のCT値-電子密度変換がなされ、新しいファイルが作成される。これをもとに、ブラッグピークの深度調節のためのポラス形状の設計、照射野形状の作成、レンジモジュレータの設定がおこなわれ、最後に、等線量曲線が作成される。ポラス形成の記録は、プリントアウトされるとともに、オンラインで数値制御加工装置に送られ、そこでMixDPを材料にポラスが切削加

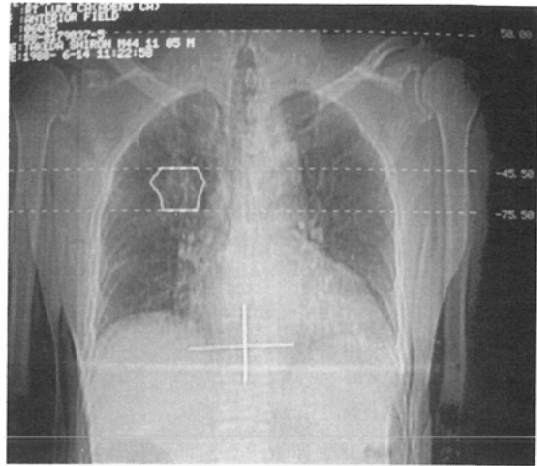


Fig. 1 The scout view with a proton field overlaid.

工される。照射野形状はCTのscout viewに重ねあわせて観察できるので、後で照射野の照準・確認をするとき大変役に立つ(Fig. 1)。scout viewは、スリット状のファンビーム曝写中に、患者を体軸方向に移動しながら撮影した透過像である。従って、その上に重ね合わされた照射野の骨に対する中心軸の水平レベルは、照射野のverification viewでも同じでなければならず、これを利用して確認できる。

以上のように、陽子線の治療計画においてはCT情報が不可欠であるが、これは病巣の進展範囲を明確に指摘しうるものでなければならない。われわれは、X線学的に病巣の位置や輪郭を正確に把握しうる手段として、病巣境界組織中に金属標識(AuグレインまたはIrシードのタミーソース)を刺入する技術を開発し、照射精度を大きく向上させることが出来た<sup>8)9)10)</sup>。ちなみに、われわれが開発した術中刺入器や経内視鏡的刺入器を用いることにより、脳、食道、胃、直腸、子宮、膀胱などの深部病巣周囲に容易に金属標識を刺入することが可能である(Fig. 2)。

### II. 照射部位の照準・確認法

陽子線照射室は、水平と垂直ビーム室の2つがある。それぞれの設備内容は若干異なっているが、ここでは主に垂直ビーム室における照準・確認システムについて述べる。

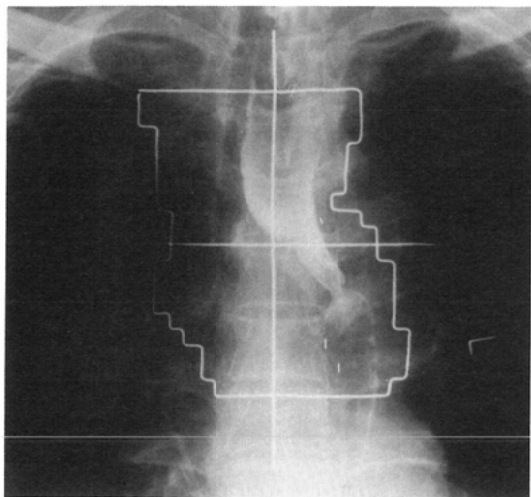


Fig. 2 The localization film of a proton field for the patient with esophageal carcinoma. Note three metal markers (iridium dummy seeds) implanted in the upper and lower part of the lesion. In this case metastatic nodes in the mediastinum were also irradiated.

陽子線のブラッグ・ピークを計算通り正確に病巣に当てるためには、毎回の照射時に患者体位の再現性を厳密に保つことを第一条件である。特に陽子線治療では、病巣周囲に3~5mm以内の安全域で標的容積を設定するようにしているの、僅かのずれも許されない。このため、われわれの照準・確認法は、単に皮膚マークだけに頼るのでは

誤差が大きすぎると考え、いくつか新しい工夫や試みがなされた。

毎回の治療時の患者体位は、原則として、CT撮影時と同一である。従って、照射計画用のCT撮影時には、陽子線ビームの入射方向を考慮したうえで、出来るだけ患者負担が少なく、容易に再現可能な体位をとらせることに留意した。上肢を挙上させるか体側に置かせるか、寝る姿勢は仰臥位か腹臥位か、あるいは基準点(線)は体表画のどこに設定するのがいいかなど、治療体位に影響を与える要因については十分に事前検討を行なった。毎回の照射時には、CT撮影を行なったとき患者表面につけた基準マーク(少なくとも3点以上)にレーザービームを一致させることにより体位の正確な再現に務めた。

患者の照射体位が決まると、次は照射部位の照準・確認であるが、このため、毎回必ずX線写真撮影あるいは透視を行なった。この方法の問題点は、X線写真撮影は写真が得られるまで時間がかかり過ぎ、透視だけだと記録が残らないという悩みである。この解決策としてわれわれは、1988年初めからリアルタイムTV画像処理装置\*を導入し、作業時間短縮と記録保持に成功した。本装置は、イメージンテンシファイア(I.I.)とX線TV装置で得られたX線透視画像をA/D変換した後、TV画像信号に含まれるランダムノイズを除

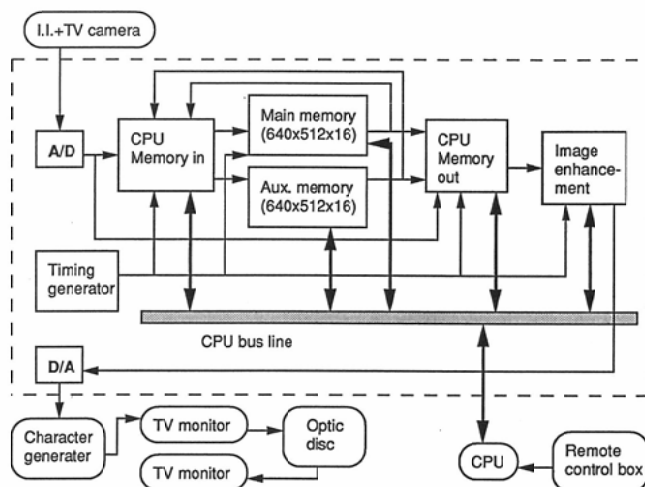


Fig. 3 A block diagram of the field localization and verification system.

去し、各種画像処理を施すことにより、一段と鮮明な画像を作ることを主目的にしたものである (Fig. 3)。TV モニタに映った X 線透視像はデジタル画像であるが、キャラクタジェネレータでコメントの入力可能で、これをそのまま光ディスクに記録できる。TV モニタを2つ用意することにより、一方には現画像、他方には前回の治療日に撮影した画像 (verification view) を映し、両者を比較しながら照射野の位置確認と修正が出来るので大変便利である (Fig. 4, 5)。

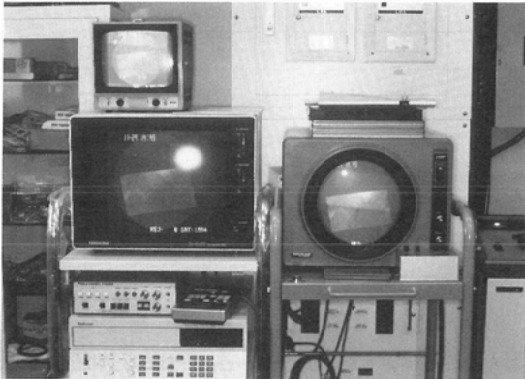


Fig. 4 The current localization view of a proton field is seen on the left TV monitor, while as a comparison the previously obtained one can be displayed on the right side.

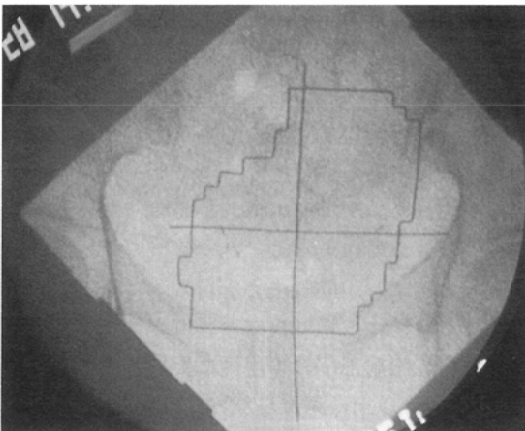


Fig. 5 A real-time digital fluoroscopic image of a proton field for irradiation of carcinoma of the uterine cervix.

### III. 照射部位再現性の精度

照射野の位置決めをおこなうのに、皮膚マークにレーザービームを一致させるという方法だけでは不十分である<sup>8)9)</sup>。われわれは、可能な限り病巣周辺に金属標識を刺入し、それを X 線学的に確認するという方法を採用してきたが、経験を重ねるにつれ、次のことが分かった。

皮膚マークに比べ、病巣周囲に刺入した金属標識の位置変動幅は小さく、従って、照射部位確認の指標として、体内金属標識は大変有用であった。しかし、数個ある金属標識相互間の位置関係を仔細に観察してみると、あるものは移動幅が大きく、他のものは殆んど不動であることが珍しくなかった<sup>9)</sup>。この原因としては、呼吸性運動、えん下運動、体腔内 (子宮癌などで腔内) へのガーゼ挿入、臓器そのものの体内移動、あるいは照射による病巣縮小などが考えられる。このような場合、もし金属標識を指標にして照射部位の照準・確認を行なおうとすると、数個ある標識のうちどれに合わせるかが問題になり、かえって混乱を来たしてしまうことになる。

現在われわれが最善と考えている照射部位の照射・確認法は、原則として、照射野と骨との位置関係を出来るだけ一定に保つことである。このとき、体内標識との位置関係が大幅に変わっていないことを確認する必要があるが、あくまで優先権は骨との位置関係にある。もし、体内標識の位置が2cm以上変化しているようなときは、そのときのセットアップ法に問題があるか、あるいは病巣の形、大きさ、あるいは位置が変化したため照射計画をやり直す必要が生じたかのいずれかである。これまでの症例についてみると、治療中に1~2回治療計画をやりなおすことが多かった。

Table 1 は、10人の患者で合計190回の照射前位置決めを行なった際、X 線透視あるいは写真撮影により、照射部位を適正な位置に修正するのに要した移動幅を計測した結果である。計測部位は、肝2、食道5、肺1、気管1、前立腺1、子宮1であった。前述のごとく、照射野の位置決めはすべて、皮膚マークにレーザービームを一致させて行なった。いま移動幅の許容範囲を3mmにとると、

Table 1 Accuracy of field placement

Patient no.	Age	Sites irradiated	No. of localization	Field placement errors (mm)					
				0-1.0	1.1-3.0	3.1-5.0	5.1-7.0	7.1-10.0	>10.0
1	51	Liver	19	42%	42%	5%	5%	5%	0%
		S4	19	11	21	21	42	0	5
2	85	Esophagus	20	25	15	10	20	30	0
3	70	Esophagus	16	6	50	44	0	0	0
4	72	Esophagus	23	48	17	17	13	4	0
5	51	Esophagus	7	100	0	0	0	0	0
6	73	Esophagus	8	13	50	13	13	13	0
7	67	Lung	23	30	39	13	9	4	4
8	38	Trachea	15	27	27	33	7	7	0
9	59	Prostate	22	18	36	14	23	9	0
10	52	Uterus	18	44	33	6	11	6	0
		Total	190	31	31	16	14	7	1

再現性に問題なしと判断しえた位置決めは62%で、残り38%は3mmより大きな修正を必要とした。陽子線治療では到底許容しえない5mm以上のずれは、全体の約5分の1以上の22%で生じていたが、これは特に皮膚が移動しやすい高齢者で強いとの印象をうけた。新システムでは、このような誤差の修正が大変容易であった。

以上より、陽子線で病巣の選択的照射を行なうためには、皮膚マークだけに頼る位置決めでは不十分で、毎回必ずX線透視あるいは写真撮影で照射部位の確認を行なう必要がある、と結論できる。

Fig. 6は、毎回X線で照射野の照準・確認をしながら陽子線照射を行なった肺野末梢型の腺癌症例である。前方1門で、このcoin lesionにのみ限局して、ピーク線量90Gyが照射された。照射後約6カ月目の側面像で見ると、陽子線の飛行に沿って線状の肺線維化が明らかであるが、それが病巣部でびたりと止まっており、その周辺や背後の肺には何の変化も見られていないことが分かる。

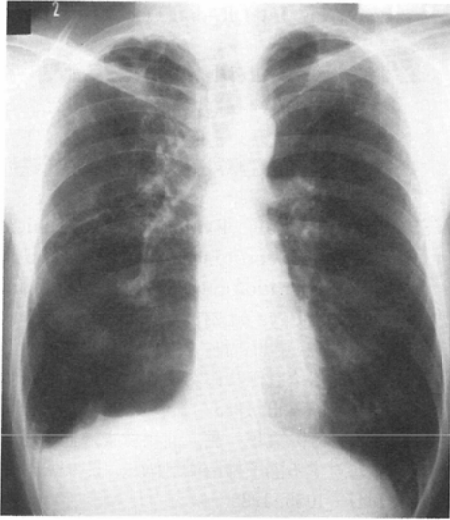
#### IV. 考 案

放射線治療において、患者体位を確実に再現、固定することの重要性は万人の認めるところで、多くの施設で色々な試みがなされている。とりわけ陽子線治療においては、眼球メラノーマや頭蓋

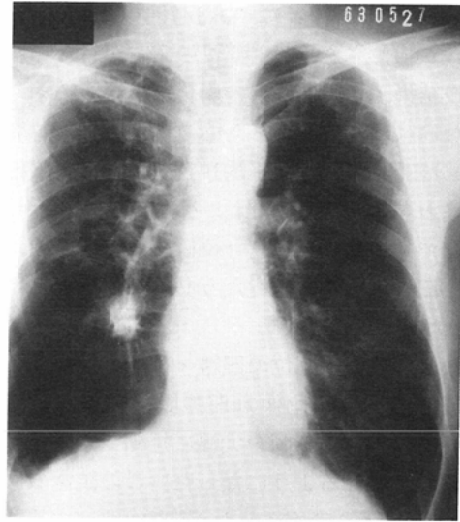
内腫瘍に代表される小さな病巣が適応になることが多いので<sup>11)~14)</sup>、僅かの誤差も許さない治療態度が要求される。

厳密な照射を行なうためには、患者体位の再現・固定法に特別の工夫が必要となる。頭頸部領域では、汎用性の機械的固定具や、患者毎に作成した頭頸部固定具(シェル)が大変有効である<sup>15)~17)</sup>。陽子線治療でも、最も症例数の多い眼球の悪性メラノーマは、シェルを用いることにより始めて精密な照射が可能になっている<sup>18)</sup>。しかしながら、躯幹部の照射に関してみると全く事情が異なり、いまだに決定的な方法がない。体表面にマーキングする方法が最も一般に行なわれているが、これが再現性に問題のあることは広く認識されているところである<sup>19)20)</sup>。

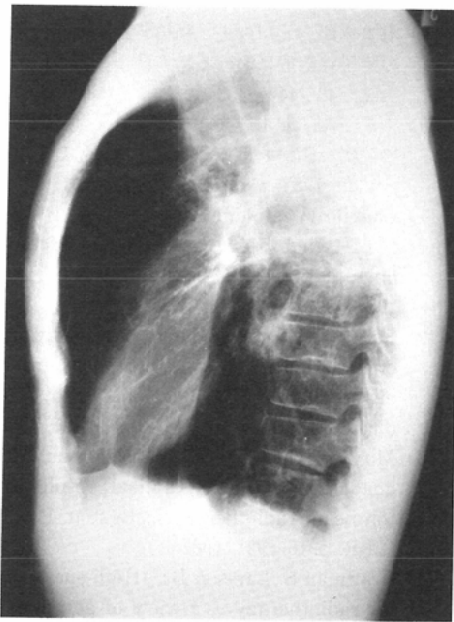
われわれの陽子線照射においては、少なくとも体表面の3カ所以上につけた十字マークをレーザビームで照準し、位置決めを行なっている。しかしこれだけでは、特に皮膚の張りが衰えている高齢者では、照射部位の再現性に問題がある。全体として3mm以上のずれは38%、5mm以上のずれは22%で観察されたが、このずれの程度は重大で、陽子線治療のように厳密な照射精度が要求される治療では、とても許容できる値ではない。毎回X



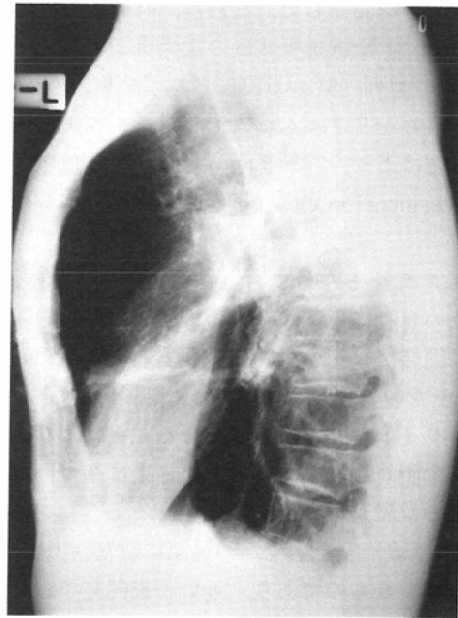
6a 上



6b 上



6a 下



6b 下

Fig. 6 A case with adenocarcinoma of the lung. (a) Before the treatment (PA and lateral). The coin lesion in the right lower lobe was irradiated through an anterior single port with 90Gy of proton beam. (b) Six months after irradiation (PA and lateral). The linear fibrotic change is observed along the proton path, but no change just behind the tumor which regressed remarkably in size.

線学的に照射部位の照準・確認作業をする必要のあることを改めて示した結果である。

同様のことは、パイ中間子治療のPSI(もと

平成元年5月25日

SIN)でも指摘されている<sup>21)</sup>。PSI方式では、患者を円柱の組織等価性物質(couch)でつつみ、その上に描いたマーキングを指標にして位置決めが行

なわれる。19例の患者につき147回以上 simulation film が撮影され、照射部位の確認が行なわれた。その結果、上腹部照射の場合、位置決めをやり直さなければならなかった回数は、1人の患者(10~20分割照射)につき平均1.1~1.5回で、照射部位のずれ幅は26%が3mmより大きな値を示した。ここでもやはり、厳密な位置決めを行なうためには、毎回X線撮影を行なう必要のあることが指摘されている。

われわれは、照射部位の照準・確認を行なうのにリアルタイムTV画像処理装置を用いるようになってから、作業時間を大幅に短縮でき、照射部位の記録も残せるようになった。この装置の原理はLeongにより考案されたが<sup>22)23)</sup>、彼は本装置を治療装置に繋げることにより、オンライン治療確認システムを開発した。これは、照射中の患者のexit doseをX線透視装置の蛍光ディテクター(線量計)の配列(512×512)でモニタリングし、得られた情報をリアルタイムでデジタル画像処理することにより、照射部位の射出線量分布とX線画像(verificarion view)を作成するというものである。

リアルタイムTV画像処理装置を利用すれば、照射部位の自動修正システムのようなものも比較的簡単に開発出来そうである。例えば、localization viewを映したTVモニタ上で照射野の正しい位置をライトペンで指示してやることにより、直ちに移動距離が計算され、その結果に基づいて治療寝台の位置が自動的に調整されるようなシステムは、陽子線治療を正確かつ迅速に行なう上で、ぜひとも必要なものであり、近い将来開発予定である。

稿を終えるにあたり、本研究の遂行に多大な御協力を戴きました佐藤 勝、細野勝久両診療放射線技師、および北海道大学医学部放射線科有本卓郎講師に、深く感謝致します。

#### 文 献

- 1) Raju MR, Phillips TL: The potential for heavy particle radiation therapy. LA-6588-MS. Los Alamos, UC-48, 1977
- 2) Suit HD, Goitein M, Tepper JE, et al: Clinical experience and expectation with protons and

heavy ins. Int J Radiat Oncol Biol Phys 3: 115-125, 1977

- 3) 北川俊夫, 稲田哲雄, 有本卓郎, 他: 陽子線治療の適応に関する検討, 癌の臨床, 32: 729-739, 1986
- 4) 北川俊夫: 深部臓器がんに対する陽子線治療, 癌の臨床, 34: 1839-1844, 1988
- 5) Suit HD, et al: Evaluatin of the clinical applicability of proton beams in definitive fractionated radiation therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 8: 2199-2205, 1984
- 6) 稲田哲雄, 早川吉則, 大原 潔, 他: 高エネルギー陽子線治療計画法に関する研究, 日本医放会誌, 43: 781-793, 1983
- 7) 稲田哲雄, 丸橋 晃, 北川俊夫, 他: 深部臓器がんに対する陽子線治療計画法, 日本医放会誌, 45: 1047-1055, 1985
- 8) 有本卓郎, 高瀬靖廣, 石川詔雄, 他: 陽子線治療における照射精度向上手段の研究, 癌の臨床, 34: 395-403, 1988
- 9) 有本卓郎, 北川俊夫, 稲田哲雄, 他: 深部臓器への陽子線治療における精度向上の試み, 日本医放会誌, 48: 444-453, 1988
- 10) 大原 潔, 北川俊夫, 稲田哲雄, 他: 陽子線治療の照射計画における一考察, 日癌治誌, 20: 1342-1348, 1985
- 11) Chuvilo IV, Goldin LL, Khoroshkov VS, et al: ITEP synchrotron proton beam in radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 10: 185-195, 1984
- 12) Suit HD, JGoitein M, et al: Evaluation of the clinical applicability of proton beams in definitive fractionated radiation therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 8: 2199-2205, 1982
- 13) Munzenrider JE, Austin-Seymour M, Gragoudas ES, et al: Clinical results of proton beam radiotherapy in Boston. Proc of 8th ICRR. p916-921, 1987
- 14) Graffman S, Larsson B: High-energy protons for radiotherapy: a review of activities at the 185-MeV synchrocyclotron in uppsala. Atomkernenergie 27: 148-154, 1976
- 15) Wang CC, Boyer A, Dosoretz, et al: A head holder for treatment of head and neck cancers. Int J Radiat Oncol Biol Phys 6: 95-97, 1980
- 16) Verhey LJ, Goitein M, McNulty P: Precise positioning of patients for radiation therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 8: 289-294, 1982
- 17) 辻井博彦, 溝江純悦, 有本卓郎, 他: 頭頸部固定具(シェル)による治療計画法, 日本医放会誌, 44: 1391-1395, 1984
- 18) Gragoudas ES, Goitein M, Koehler A, et al:

- Proton irradiation of malignant melanoma of the ciliary body. *Brit J Ophthal* 63: 135-139, 1979
- 19) 尾内能力夫：放射線抵抗性癌の対策：空間的線量分布の観点から，癌の臨床，26：1472-1479, 1980
- 20) Byhardt RW, Cox JD, Hornburg A, et al: Weekly localization films and detection of field placement errors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 4: 881-887, 1978
- 21) Tsujii H: Method and accuracy of patient immobilization for proton therapy. *SIN Medical Newsletter* 4: 12-14, 1982
- 22) Leong J: Use of digital fluoroscopy as an on-line verification device in radiation therapy. *Phys Med Biol* 31: 985-992, 1986
- 23) Leong J: A digital image processing system for high energy X-ray portal images. *Phys Med Biol* 29: 1527-1535, 1984
-