



Title	Development of Evaluation Model for Self-Wastage Phenomena in Steam Generator of Sodium-Cooled Fast Reactor
Author(s)	張, 承賢
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/53976
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (SUNGHYON JANG)	
論文題名	Development of Evaluation Model for Self-Wastage Phenomena in Steam Generator of Sodium cooled Fast Reactor (ナトリウム冷却高速増殖炉蒸気発生器におけるセルフウェステージ現象評価モデルの構築)
Sodium-cooled fast breeder reactor uses liquid sodium as a moderator and coolant to transfer a heat from reactor core. The main hazard associated with sodium is the vigorous reaction with water. Sodium-water reaction (SWR) takes place when water or vapor leak into sodium side through a crack on a heat transfer tube in a steam generator. The reaction is highly exothermic. Thus, if a water leakage continues, the SWR deteriorates the tube wall by corrosive reaction products such as sodium hydroxide (NaOH). At the same time, a high-pressure water and vapor peel out the weakened material from the surface. As a result the crack is enlarged. This enlargement of the crack is called ‘Self-wastage phenomena’. If the tube wall is penetrated by the self-wastage, the leak rate will dramatically increase. It has the possibility that an increased resultant leak damage neighboring heat transfer tubes, it might lead to secondary failure. Therefore, a description of the SWR is an essential issue for safety design of steam generator in a sodium cooled fast breeder reactor. So far in order to depict the self-wastage phenomena and evaluate the phenomena quantitatively mock-up tests were carried out. However, uncertainties due to immature measurement technology, opacity of liquid sodium and many related parameters made difficult to obtain data with high spatial resolution and accuracy. Thus, an experimental approach is not sufficient to give us a clear understanding about the phenomena. Accordingly, we have elaborated alternative ways to evaluate the self-wastage phenomena using a computational code of multi-component multi-phase flow involving sodium-water chemical reaction, SERAPHIM (Sodium waTer Reaction Analysis PHysics of Interdisciplinary Multi-phase flow). We compromised an evaluation model which consists of 5 steps of numerical procedures. Based on the developed scheme, a benchmark analysis of SWAT (Small leak sodium-Water reAction Test loop) experiment has been carried out to validate the feasibility of the new method. Numerical results show that the enlarged opening appears to taper inward to a significantly smaller opening on the inside of the tube wall. The outer diameter is 4.72 mm. The outer diameter of SWAT experimental result is 4.96 mm. Also the shape of enlarged nozzle of the SWAT experiment has similarity with the numerical result. Thus, the numerical benchmark analysis demonstrates the applicability of the self-wastage evaluation model to evaluate the self-wastage phenomena. Another approach to understand the behavior of the self-wastage, simulated experiment is devised. Since the self-wastage phenomena is attributed to interaction between a wall material and an exothermic chemical reaction which takes place at nozzle exit. We adopt hydrochloric acid and sodium hydroxide solution and paraffin were as candidate materials. We assume that melting of nozzle surface of paraffin wax by the reaction heat released by the neutralization reaction represents the self-wastage phenomena. Through a numerical feasibility analysis, it is demonstrated that the maximum temperature at the surface is high enough to melt paraffin surface. Like the self-wastage phenomena propagation, a propagation of melting also take place around nozzle exist then, it advances through the tube wall toward the inlet direction. The resultant shape of enlarged nozzle of simulant experiment has similarity with the SWAT experiment. Thus, the simulant experiment shows its applicability on evaluation of the behavior of the self-wastage phenomena.	

Finally, we consider influence of some parameters on the phenomena. Analyses of the influence of average leak rate and initial leak diameter on the self-wastage behavior are carried out using reference experimental data. It is found that the average leak rate strongly related to the self-wastage rate and both the initial leak diameter and average leak rate has a negative reciprocal relationship with the enlargement ratio.

These studies suggests new approaches to deepen our understanding about the behavior of the self-wastage phenomena and evaluate the self-wastage phenomena. Numerical analysis using SERAPHIM code and simulant experiment is also a good alternative way to expect the self-wastage phenomena behavior. It is expected that further researches through these method deepen our understanding about the self-wastage behavior and give us a chance for quantitative self-wastage evaluation.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ 張 承 賢 ）			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教 授	福田 武司
	副 査	教 授	望月 正人
	副 査	教 授	山口 彰 （東京大学大学院工学系研究科）
	副 査	准教授	北田 孝典
	副 査	准教授	帆足 英二

論文審査の結果の要旨

優れた熱伝達特性を持つ液体ナトリウムは、大気圧下での沸点が高く、中性子の減速能力が低いことから高速増殖炉の減速材(冷却材)として広く用いられている。一方、液体ナトリウムは化学的に活性であり、大気中の酸素や水と激しく反応する。ナトリウム冷却型高速炉では、蒸気発生器内伝熱管破損によるナトリウム-水反応が安全工学の面で喫緊の研究課題と認識されている。ナトリウム冷却型高速炉の蒸気発生器内では、液体ナトリウムと高圧の水蒸気が薄い伝熱管を介して存在しているため、何らかの原因で伝熱管表面に亀裂が生じると伝熱管の内側に存在する高圧の水蒸気が激しく外側に噴出し、ナトリウム-水反応が起きる。伝熱管からの漏洩が継続してナトリウム-水反応が継続すると、腐食性が強い反応生成物と反応熱によって伝熱管表面の機械的強度が低下する。また、高圧の水蒸気噴流により、脆弱になった伝熱管の表面が削られ、伝熱管の亀裂が拡大する。このナトリウム-水反応による伝熱管の自己減肉現象をセルフウェステージ現象である。セルフウェステージによって亀裂が拡大すると漏洩率は急激に増加し、周囲の伝熱管に 2 次破損を及ぼす恐れがある。従って、セルフウェステージ現象の挙動を理解し、定量的な評価を行うことは、高速増殖炉システムの安全性向上のために重要である。

従来、セルフウェステージ現象の挙動解明と定量評価に係わる研究は、モックアップ(模擬)試験に限定されていた。しかしながら、液体ナトリウムは可視域において不透明であり、ナトリウムが化学的に活性的であることから、セルフウェステージ現象に伴う物理量の変化を測定することが困難であった。また、セルフウェステージ現象には多くの物理量が関与する複雑な現象であり、包括的な数理モデルの構築は極めて困難であると考えられていた。

本研究では、セルフウェステージ現象の定量評価を目的とした数値解析手法の構築を目的とした。ナトリウム-水反応を機構論的にモデル化した多成分多相流数値解析手法に基づく SERAPHIM (Sodium-watEr Reaction Analysis; Physics of Interdisciplinary Multi-phase flow)コードを断熱条件の下でセルフウェステージ現象に適用した。その結果、漏斗型の断面を持ったモックアップ試験の結果を高い精度で定量的に再現することが出来た。この成果は、セルフウェステージ現象の数値解析に展望を与えるものであり、当該分野における高い評価を得ることが出来た。

セルフウェステージ現象の挙動を理解するための別のアプローチとして、模擬物質を用いる実験を考案した。セルフウェステージは、ノズル出口付近で生じる発熱反応と伝熱管材料間の相互作用に起因する現象である。模擬実験では、塩酸を融点が高いパラフィンワックスノズルを通し、水酸化ナトリウム水溶液側へ注入することによってノズルの出口付近で中和反応を起こし、反応熱によるワックスノズルの拡大を評価するものである。考案した方法の妥当性評価を目的として、モックアップ試験と同じ流れ場の条件で 5 mol の HCl と NaOH 水溶液を用いた数値計算を行った結果、反応熱によって拡大したノズルの形状がモックアップ試験の結果と同じ漏斗型となっていることが分かった。この結果から、模擬実験の有効性を示すものである。

また、セルフウェステージ現象に関係するパラメーターの影響を評価するため、初期孔径や初期リーク率の他、平均リーク率等のパラメーターがセルフウェステージ率や拡大孔径、孔径拡大比に与える影響を調べた。その結果、平均リーク率はセルフウェステージ率、拡大孔径と正の相関関係があり、また初期孔径と平均リーク率は確率孔径比と負の相関関係であることが分かった。斯様な数値計算は、セルフウェステージ現象に関する理解と定量的評価に資するところが大い。

本研究では、セルフウェステージ現象を評価する数値解析手法を提案した。また、パラフィンワックスを用いた模擬実験の有効性を示すことに成功した。さらに、平均リーク率や初期孔径がセルフウェステージ現象に与える影響を評価し、セルフウェステージ現象の定性的理解と定量的評価に貢献することが出来た。

以上のように、本研究はエネルギー開発に係わる優れた研究成果であり、環境・エネルギー工学の発展に顕著な寄与を果たすものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。