

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	沸騰水型軽水炉過酷事故の炉心損傷における燃料系金属反応に関する研究
Title(English)	Study on the metallic materials interaction from fuel claddings during the core degradation under severe accident conditions of BWR
著者(和文)	伊藤 あゆみ
Author(English)	Ayumi Itoh
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11994号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小林 能直,竹下 健二,加藤 之貴,木倉 宏成,吉田 克己
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11994号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	伊藤 あゆみ		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	小林 能直	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は「沸騰水型軽水炉過酷事故の炉心損傷における燃料系金属反応に関する研究」と題し、全 7 章から構成される。

第 1 章「緒論」では、福島第一原子力発電所 (以降 1F) 事故炉の炉内損傷進展状況を概観し、これまでの格納容器内部調査において確認された、压力容器 (以降 RPV) 底部スチール製貫通構造物の著しい破損状況について、従来の過酷事故解析モデルでは説明ができないことを指摘し、過酷事故進展における構造物破損挙動予測と実現象の乖離にその要因があることを述べている。1F 事故では炉心を構成する金属が、意図しない接触によって熔融・凝固を繰り返し、複雑な流動を経ることにより構造物破損に至るが、従来の過酷事故解析はそのような反応が考慮されていないことを述べ、素材製造産業分野における制御されたプロセスでは同様の破損現象を評価する手法は確立されていないことに言及し、高温金属反応において熔融・凝固を伴う流動を評価する手法を開発し、その手法を BWR 過酷事故事象に適用することで、金属反応による RPV 破損機構を提示する必要があることを指摘し、本論文の意義と目的を述べている。

第 2 章「過酷事故における燃料系融体の熱的性質および反応性の熱力学的評価」では、第 1 章で提起した手法を過酷事故事象進展解析に適用する際に必要となる、燃料溶融物の熱力学的性質の調査および鉄鋼材との反応性の平衡論的評価を行っている。燃料溶融物の基本系である U-Zr-O 三元系融体の、事故反応時の最尤組成を決定し、当該組成融液と Fe の共存下における相安定性を解析することで、鉄鋼材料溶損挙動を支配すると考えられる反応式 $\text{Fe-Cr}+\text{U}_{14}\text{Zr}_{43}\text{O}_{43}\rightarrow(1)\alpha\text{-Zr(O)}+(\text{U,Zr})\text{O}_{2-x}\text{+L}$, $(2)\text{ZrO}_2+(\text{Fe,Cr})_2\text{Zr+L}$, $(3)\text{ZrO}_2\text{+L}$ を提案している。本応が十分な Fe 供給を伴って起これば鉄鋼材料の潜熱を上回る発熱を伴うことになるため、溶損挙動をさらに促進する可能性があることを見出している。

第 3 章「半溶融状態金属の反応流動解析手法の開発」では、組成変化を伴う反応における反応・凝固現象評価モデルを新たに提案し、鉄鋼生産プロセス分野などで高い評価を得ている合金の温度変化を伴う溶融凝固現象評価モデルと組み合わせることにより、高温金属反応を伴う流動挙動を総合的に評価する手法として提示している。この手法は、固体中の溶質濃度を一意に定められる固液平衡状態であれば、液相線温度を溶質濃度の関数として表すことにより、三元以上の物質系の解析においても容易に導入することができるとし、具体的な実行手法として数値流体計算ソフト Ansys Fluent 2020 R1 への導入手順を示すとともに、沸騰水型軽水炉 (以降 BWR) における炉心物質の溶融反応を評価するために必要な物性値の整理・本評価手法に適用できる形式の整備を行い、事故反応における金属間反応による構造物破損の定量評価法の確立という結果を得ることができ、応用の可能性を展開・確認している。

第 4 章「燃料系金属融体形成機構を通した手法の妥当性評価」では、燃料系金属融体形成挙動について第 3 章で提示した手法を用いて解析を行い、1940℃ における UO_2 と Zr 間の材料反応実験に対して検証を行っている。これにより、等温過程における反応を伴う燃料系材料の流動挙動について、界面反応による固相成長および析出物の影響によりバルクの対流は 30% 程度弱められるために溶解過程が界面近傍の高粘性融体領域に律速されるという複雑な反応・流動機構を解明することができ、2000℃ 以下における固液共存状態における UO_2 溶解挙動に対する現象理解が深めている。

第 5 章「燃料系融体によるスチール溶損挙動評価」では、高温 (2227℃) の燃料系融体と低温 (327℃) の鉄鋼材料が界面反応を伴いながら流動する挙動について、第 3 章で提示した手法を応用 (燃料系融体とスチールを別々の相として定義して熱物性値を与え混相流解析と併用することによって異種合金間物質移動を扱えるように工夫) して解析と評価を行い、非等温における異種合金の接触反応を評価することが可能であることを示し、鉄鋼材料との接触による高温融体の冷却効果よりも、Fe-U-Zr-O 四元系融体が生成する際の反応熱が勝り、その発熱による溶損挙動が著しくなることを見出している。さらに、本反応によって界面に堆積する析出物のうち、U を含む金属混合物は、鉄鋼材料よりも数百 K 低い温度で再溶融するため、より大規模な溶損を誘発する“二次溶損”の可能性があることを指摘している。

第6章「金属反応による RPV 破損機構の提案」では、本研究で開発した解析手法を総括するとともに、解析によって得られた炉心溶融事故進展に関する複数のプロセスにおける知見に基づき、金属反応により鉄鋼材料の著しい損傷を伴う RPV の破損シナリオを提示している。そのシナリオを用いて福島第一原子力発電所 1、2、3 号機の事故進展を検討し、圧力測定値より推定されている RPV 破損時間を 1 時間半以内の精度で説明できることを示し、これまで熱水力の観点から説明されていた RPV 破損に対して材料学的機構論に基づく解釈を与えることに成功している。最後に今後さらなる過酷事故材料研究に向けた提言として非平衡反応の一例である準安定凝固反応を扱う重要性について述べている。

第7章「結論」では、本論文で得られた結果を総括している。

以上を要するに、本論文は、沸騰型軽水炉の過酷事故時の炉心損傷進展プロセス解明のため、高温金属反応において溶融・凝固を伴う流動を評価する手法を開発し、その手法を BWR 過酷事故事象に適用することで、金属反応による RPV 破損機構を提案したものであり、福島第一原子力発電所過酷事故炉廃炉・収束に向けても道筋を与えることに資するものであって、工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として、十分な価値があるものと認められる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	材料	系
Department of, Graduate major in	原子核工学	コース
学生氏名：	伊藤 あゆみ	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野)：	博士	(工学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員 (主)：	小林 能直	
Academic Supervisor(main)		
指導教員 (副)：		
Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants, the Primary Containment Vessel (PCV) investigations have revealed that the lower plenum of reactor pressure vessel (RPV) was severely destroyed with the intensive amount of partially molten steel penetration structures, which has been not explained fully by the severe accident code analysis. This is because the code analysis model does not consider that the molten core materials relocation and their chemical interaction takes place together. In this study, the methodology to calculate the metallic materials fluid and their chemical reactions had been developed by newly introducing the compositional supercooling solidification into the solidification model which has been used successfully in the steel-making industry, was validated against the $\text{UO}_2\text{-Zr}$ reaction experiment at high temperatures and applied to the U-Zr-O/steel reaction. As a result, the calculation results of $\text{UO}_2\text{-Zr}$ analysis showed good agreements with the experimental observation and it was understood that the rate-limiting process of UO_2 dissolution under 2000 °C in the liquid-solid mixtures consists both of the convection-controlled and diffusion-limited ones depending on the equilibrium condition at the reaction boundary. Also, the U-Zr-O/steel reaction analysis exhibited that the exothermic reaction of Fe-U-Zr-O could promote the steel destruction more than cool the U-Zr-O by Fe with the large heat capacity, and the reaction product including U metal on the steel surface could follow the secondary liquefaction due to the decay heat during the severe accident progression. On the basis of these results, the RPV failure scenario was proposed by combining the liquefaction of low liquidus metallic materials and the U-contaminated steel produced by U-Zr-O/Steel reaction. In conclusion, it is possible to evaluate the complicated motion of liquid-solid mixture molten metals considering the interaction and help to understand the steel structure destruction mechanism during the accident progression of BWR.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).