

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高速炉燃料溶融事故時の再臨界防止のための内部ダクト壁の破損挙動に関する研究
Title(English)	An Analytical Study on Failure of Inner Duct Wall within Fuel Sub-Assembly with Molten Core Materials in an LMFBR
著者(和文)	豊岡 淳一
Author(English)	Toyooka Jun-ichi
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9478号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:高橋 実,青木 尊之,小原 徹,加藤 之貴,木倉 宏成
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9478号, Conferred date:2014/3/26, 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

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：	原子核工学	専攻	申請学位(専攻分野)：	博士	(工学)
Department of			Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名：	豊岡 淳一		指導教員(主)：	高橋 実	
Student's Name			Academic Advisor(main)		
			指導教員(副)：	青木 尊之	
			Academic Advisor(sub)		

要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

次世代ナトリウム冷却高速増殖炉 JSFR (Japan Sodium-cooled Fast Reactor) の設計においては、炉心溶融事故時に溶融燃料を早期に炉心外に排除することにより再臨界を回避する目的で燃料集合体内部に溶融燃料を流出させる経路(内部ダクト)を設けた FAIDUS 集合体(Fuel sub-Assembly with an Inner DUct Structure)を採用している。本研究では FAIDUS 集合体の有効性と物理挙動の確認を目的として実施した EAGLE ID1 炉内試験を対象として、試験で観測された内部ダクト壁の早期破損に至る過程の伝熱機構を明らかにすることを目的とし、解析的研究を実施した。本論文は 6 章からなり、各章は次のようにまとめられる。

第 1 章“序論”では、本研究の背景と目的、従来研究の内容と限界、及びこれを踏まえた本研究のアプローチについて述べている。JSFR では内部ダクトを通じた早期燃料流出によって炉心内に大規模な溶融プールが形成されるのを未然に防ぐ設計方策を採用しており、その成立のためには内部ダクト壁の早期破損が鍵になる。本研究の対象とした ID1 試験では、確かに早期破損と見られる結果が得られたが、これまでの解析的研究では早期破損に至る伝熱のメカニズムが理解されていなかった。この原因の一つには多くの物理パラメータが相互に関連しつつ急激に変化するために、物理過程と伝熱の関係が見え難い状況があった。本研究では一部のモデルについて簡略化を行い、それによって物理過程の明確化を図った点に特徴がある。

第 2 章の“炉心燃料集合体内部ダクト壁破損試験”では ID1 試験の目的、試験体系や計装、試験条件及び試験結果について述べた。ID1 試験は EAGLE-I シリーズ炉内試験の中でも鍵となる試験であり、実機の高出力集合体を模擬した条件で溶融プールを形成し、内部ダクト壁の破損と溶融物質の流出を実現した。ID1 試験から得られたデータにより、早期のダクト壁破損、極めて短時間内のダクト内のボイド化、そしてボイド化したダクト内を 1 秒程度で溶融物質が流出する挙動が把握された。この結果は流出開始を決めるダクト壁破損が早期であるばかりでなく、ダクト壁破損後の流出過程においてもスムーズな流出が期待できることを示唆した。

第 3 章“内部ダクト壁の破損に至る過程の評価解析方法”では、プールの形成とダクトへの伝熱挙動を評価した多成分・多相・多速度場モデル SIMMER-III のモデルの概要と解析体系、及び解析条件を示した。ID1 試験では燃料ピン形状から燃料を加熱してプールを形成したが、SIMMER-III は燃料ピンモデルを有し、燃料や被覆管を溶融の進展とともに移動場に移すことで、燃料ピンが崩壊し、プール

を形成しつつダクト伝熱が進行する過程を機構論的かつ連続に評価することができる。また SIMMER-III の解析結果を実験データと比較するためには実験での熱電対の信号から熱電対や固定材の熱容量効果を除いてやる必要がある。そこで 2 次元の熱伝導解析モデルを有する TAC2D コードを用いた評価を別途実施した。この TAC2D 解析では熱電対信号応答に整合するダクトへの伝熱の情報が得られ、試験でダクト壁破損が観測された時間の破損位置近傍のプールに接するダクト表面温度は 1625 K と評価され、破損に至る過程の平均的熱流束は 10.7 MW/m^2 と評価された。このような TAC2D の解析結果から SIMMER-III 解析の比較に用いることのできるダクトへの伝熱情報を得るとともに、ダクトへの伝熱に関わる実験からの直接的な情報を得た。

第 4 章“内部ダクト壁の破損に至る過程の評価結果”では、SIMMER-III コードを用いた解析結果について、ダクトへの伝熱への影響の観点からスチール成分の分布や温度、流動様式、ダクト表面上への燃料クラストの形成などに着目して詳細な分析を行った。この結果、プール形成の過程でプールの中上部にスチール成分の多い領域が形成され、この部分では燃料クラストの形成がなく、高い熱流束が生じることが示された。SIMMER-III コードでのクラスト非形成領域における熱流束値は約 10 MW/m^2 と評価され、TAC2D コードによる評価結果とほぼ一致した。このように、燃料ピン崩壊過程を詳細に模擬するとともに、伝熱に関わる一部のモデルを簡略化した解析の結果、燃料クラストの存在しない部分での高温スチールからダクトへの直接的な伝熱が高い熱流束をもたらしている状況が把握され、本研究の目的である伝熱の物理メカニズムが解明された。

第 5 章“内部ダクト壁破損時間に関わるパラメータ解析”では 4 章での基準ケース解析におけるダクトへの伝熱の不確定性を評価するためのパラメータ解析を実施した。この結果、燃料崩壊の過程で熔融スチールは燃料と分離することなく液滴半径 1 mm 程度以下に相当する粗混合状態にあったと考えられること、プールの流動に伴う動的不安定性に伴う微粒化は顕在化していないと考えられること、スチールがダクト表面に凝縮することによる熱伝達は顕在化していないと考えられること、モデル上燃料クラスト形成時に考えられる伝熱の過小評価は顕在化していないことが示された。これにより、基準ケース解析の内容は基本的に現実的な物理過程に対応したものであり、考慮した伝熱に関わる不確定性は第 4 章の結論に影響しないとの結論を得た。

第 6 章“結論”では、以上の各章の結果をまとめて結論としている。

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).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：	原子核工学	専攻
Department of		
学生氏名：	豊岡 淳一	
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)：	高橋 実	
Academic Advisor(main)		
指導教員 (副)：	青木 尊之	
Academic Advisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In the design of JSFR (Japan Sodium-cooled Fast Reactor), a design measure (FAIDUS : Fuel sub-Assembly with an Inner DUct Structure) is considered to prevent severe re-criticality events even in case of core disruptive accidents (CDAs) by molten fuel ejection out of the core region through the duct equipped within the fuel sub-assembly rather than creating a whole-core molten pool.

In order to get experimental data to demonstrate effectiveness of this design concept, EAGLE-1 series tests consisting of in-pile and out-of-pile tests have been conducted in Republic of Kazakhstan. The in-pile part of this program was conducted using the IGR (Impulse Graphite Reactor) facility. Among several in-pile tests, the ID1 test is regarded as the key experiment, which best represented the reactor condition of interest.

In the present study, the ID1 was analyzed using the SIMMER-III code focusing on heat transfer from molten core materials to the duct. The SIMMER-III results were compared with the experimental results with help of TAC2D code, which enabled getting rid of the thermal inertia effect of the thermocouple and soldering.

This study revealed that the early duct failure, which is the key for the effectiveness of the FAIDUS design concept, was caused by high heat flux from the molten fuel-steel mixture to the duct. This high heat flux was maintained by direct contact of high temperature steel with the duct without fuel crust on the duct. This mechanism strongly suggested effectiveness of the FAIDUS concept where an early failure of the duct in advance to the wrapper tube is indispensable.

It was also confirmed that the experimental results can reasonably be simulated by the mechanistic model of the SIMMER-III code. This successful simulation of the experimental results provided a good perspective for establishment of a reliable evaluation method applicable to the reactor condition.

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).