

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630481

研究課題名(和文)メルトダウン炉心臨界事故解析

研究課題名(英文)Criticality accident analysis in meltdown core

研究代表者

小原 徹(Obara, Toru)

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授

研究者番号：40221858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はメルトダウンした炉心が万一臨界となった場合の放出エネルギー及び放射線量の評価法を確立することを目的としている。新たに開発された動特性解析コードを用いることで炉心内に異なった状態の複数の燃料デブリ領域がある場合の動特性解析を行うことが可能であることが明らかになった。本研究により臨界となった燃料デブリの近傍に他の燃料デブリが存在する場合の放出エネルギー及び放射線量の増加量を評価する方法が確立された。

研究成果の概要(英文)：This study aims to establish analysis method to estimate released energy and radiation dose in the case of criticality accident of meltdown core. It was shown that it is possible to perform kinetic analysis when there are some fuel debris regions in different condition in the core by the use of newly developed code. A method was established to estimate the increase of released energy and radiation dose when fuel debris exists around the fuel debris which becomes critical.

研究分野：原子力学

キーワード：福島第一原子力発電所事故 燃料デブリ 臨界事故 放出エネルギー 放射線量

## 1. 研究開始当初の背景

東京電力福島第一原子力発電所事故では、1号機から3号機の炉心が熔融後固化した状態となっていると考えられる。原子炉内部の状況は現在も不明であるが、熔融した炉心の一部が原子炉圧力容器を突き抜け下部で冷えて固まっていると考えられている。この場合、炉心下部へは熔融した物質が少しずつ落下し、水で冷えたため多数の小さな塊を形成して現在も水に浸されている可能性がある。一方、下部に落下しなかった熔融炉心はそのまま原子炉圧力容器内にとどまり、大きな塊を形成している可能性が高い。現在熔融固化した炉心は臨界となっておらず核分裂連鎖反応は起きていないと考えられている。今後事故の完全収束のためにはこの熔融固化した炉心を除去する必要がある。この作業はそれ自体困難な作業であるが、作業中に考えられる大きな懸念の一つに炉心内にとどまっている熔融後固化した大きな塊が、作業中に下部に落下して、格納容器下部にたまっている小さな熔融固化した多数の塊の上に落下するということがある。格納容器下部の小さな塊の集積物の間は水で満たされているため、落下により原子炉圧力容器内にとどまっていた熔融固化炉心が下部の集積物に接近あるいは接触することにより臨界状態となり核分裂連鎖反応が生じる可能性がある。この際にどれだけのエネルギーと放射線が発生する可能性があるか定量的に評価し、もしその量が作業者に影響を与えるほど大きいものであると予想されるならば、あらかじめ対策を考えておかなければならない。しかしながらこれまで用いられてきた通常の原子炉の出力変化を評価する計算手法は、規則正しく配列されかつ炉心を一つの領域として近似する手法であるため、今回のような体系での放出エネルギーや放射線量を評価することは困難である。

## 2. 研究の目的

研究代表者は、これまで核励起レーザー発振用原子炉の超臨界時の出力変化を解析する手法を開発している。この原子炉は一般の原子炉と異なり、大きく性質の異なった複数の炉心領域が中性子輸送的に弱く結合した体系となっており、今回問題となっている熔融固化炉心の体系と物理的に類似している。本研究では、すでに開発している核励起レーザー発振用原子炉用解析用計算コードを、複数の性質のことなる熔融固化した炉心が接近・接触した際の放出エネルギーおよび放射線量の解析ができるよう改造・改良することで新たに開発し、臨界事故時の放出エネルギーと放射線量の評価方法を確立することを目的としている。

## 3. 研究の方法

すでに開発している核励起レーザー発振用原子炉の核分裂連鎖反応の時間変化を解析する計算コードを改造し、熔融固化した炉心が接近・接触した際の核分裂連鎖反応の過渡変化の解析に適用できるようにする。物理的にはどちらも離散した炉心が中性子輸送的に弱く結合した体系であり、原理的には適用可能であるが、炉心を構成している物質の組成が全く異なるので反応度フィードバック効果が全く異なり、パルス状のエネルギー放出挙動が異なってくる。このため、計算コードの必要な改造を行うと同時に本解析に適した負の反応度フィードバックモデルをプログラムに組み込む。その後予備的な解析を行った後、現在の1号炉から3号炉の熔融・固化した炉心の状況を現在公表されつつあるシビアアクシデント解析の結果をもとに推定し、考えられるいくつかの場合について解析を行い臨界時の放出エネルギーと放射線量の評価を行った。

## 4. 研究成果

(1)核燃料溶液の弱結合体系での動特性解析  
燃料デブリの動特性解析を行うための準予備的解析として、超臨界時の動特性実験結果がある核燃料溶液の超臨界時の動特性解析を行い、解析コードの妥当性の検討を行った。

はじめに核励起レーザー発振用原子炉解析用に開発されていたコードを、複数の核燃料溶液タンクが存在する場合の動特性解析に用いることができるよう改造・改良を行った。燃料製造過程あるいは再処理過程では溶液状の燃料を扱う必要があり、通常この核燃料溶液は臨界とならないように厳重な管理が行われている。万一、溶液中の燃料の濃度、濃縮度、溶液タンク内の核燃料溶液の量がある条件を満たすと、超臨界状態となり急速に核分裂連鎖反応が進展してエネルギーと放射線が発生する。発生した放射線により放射線分解ガスが発生すると中性子のもれが大きくなり、溶液は未臨界となる。その後ガスが溶液から抜けると再び超臨界となる現象が繰り返される。このとき、超臨界となった核燃料溶液の近傍に、別の核燃料溶液タンクがあった場合、もとの核燃料溶液タンクでの核分裂による中性子が近傍にある核燃料溶液で核分裂を起こし、その核分裂で発生した中性子が元のタンクの核燃料溶液で核分裂を起こすという相互作用が生じる。この相互作用によるそれぞれの核燃料溶液での出力の変化を本コードで行った。その結果、本コードを用いてそれぞれの燃料溶液で核分裂が相互に作用して発生する状況をシミュレートすることが可能であることが明らかになった。解析結果の例を以下に示す。

図1は3つの核燃料溶液タンクが存在する場合の解析体系の例である。この解析では、

3つのタンクが直線状に並んでいる場合 (System A) 及び3つのタンクがL字型に並んでいる場合 (System B) について解析を行った。その結果、超臨界となった場合の核燃料溶液タンクの出力の変化はそれぞれ図2、図3のようになった。反応度が投入された Tank-1 の核分裂に伴い、近傍にある Tank-2、Tank-3 でも核分裂が誘発され出力が発生している状況が現れている。さらに、タンクの配置により Tank-2、Tank-3 での出力変化及び出力ピークの遅れなどにも違いが生じていることが現れている。本解析の詳細は、〔雑誌論文〕①②及び〔学会発表〕①⑥のプロシーディング集・発表予稿集にまとめられている。

## (2) 核燃料デブリを模擬した弱結合体系での解析

核燃料溶液体系での予備解析の実績を踏まえ、改良されたコードを福島第一原子力発電所でメルトダウンした炉心で推定される核燃料デブリの状態について解析を行った。

初めに想定される状況として、溶けた燃料デブリが水により急速に冷却されて細かい粒子状になった場合について検討を行った。解析では、直径数ミリの燃料デブリ粒子が軽水とまざり球形の体系を形成し、さらにその近傍に同様な球形の核燃料デブリと軽水の混合領域が存在するとして、この二つの燃料デブリが相互に中性子のやり取りにより核分裂を誘発する場合の解析を行った。解析体系の概念図を図4に示す。この体系の Unit-1 に反応度を投入した場合の出力の変化の解析例を図5に示す。図5より、Unit-1 での核分裂の発生により Unit-2 でも核分裂が発生し、出力が上昇しているのがわかる。このため、このような体系では Unit-1 のみを対象とした体系での解析では、放出エネルギーを過小評価してしまうことになり、Unit-2 の効果も考慮に入れた解析が必要であることがわかる。放射線量は放出エネルギーに比例するため、放射線量も同様な結果となる。例えば作業員の位置での被ばく線量を評価は、本解析結果を用いデブリのからの距離と途中の遮蔽物を考慮に入れた遮蔽計算を行うことで可能である。

溶けた燃料デブリの冷却固化の条件によっては粒子状の燃料デブリの近傍に大きな塊の燃料デブリが存在している可能性もある。このため、別の想定される状況として、粒子状の燃料デブリと軽水の混合領域の近傍に燃料デブリの固まりがある場合について解析を行った。図6に本解析体系の概念図を示す。このような体系に対して、粒子状の燃料デブリ領域に反応度を投入した場合の出力変化の解析例を図7に示す。この場合は、燃料デブリの塊の出力は先の二つの粒子状デブリでの解析に比べるとかなり小さいことがわかる。これは、塊状の燃料デブリでは内部に減速材が存在していないことを想定しておりこのため燃料デブリの無限増倍率

が小さくなるためと考えられる。この場合においても、反応度が投入された粒子状の燃料デブリに対する解析のみでは、放出エネルギー及び放射線量を過小評価することになり、近傍にある核燃料デブリの塊の効果を入れた解析を行う必要があることが分かる。これらの解析の詳細は、〔雑誌論文〕③及び〔学会発表〕②③④⑤⑦⑧⑨に記載されている。

## (3) 研究成果まとめ

核励起レーザー発振用原子炉用解析用計算コードを複数の性質のことなる熔融固化した炉心が接近・接触した際の放出エネルギーおよび放射線量の解析ができるよう改造・改良することで、複数の燃料デブリが存在し臨界となった場合の動特性解析コードを新たに開発した。はじめに予備的解析として複数の核燃料溶液タンクがある体系での超臨界時の放出エネルギーの解析に適用し、本コードが適用可能であることが明らかになった。次に、本コードを核燃料デブリの体系での解析に適用した。解析はメルトダウンした炉心内の状況の推定から、核燃料デブリ粒子の領域のみからなる体系及び核燃料デブリ粒子の領域と核燃料デブリの塊の領域からなる体系に対して行った。その結果、本コードはこれらの核燃料デブリからなる体系での解析にも可能であることが明らかになった。本研究により臨界となった燃料デブリの近傍に他の燃料デブリが存在する場合の放出エネルギー及び放射線量の増加量を評価する方法が確立された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① Haruka Kikuchi、Toru Obara、  
“Kinetic Behavior in Criticality Accident of Two Fuel Solution Tanks”、*Progress in Nuclear Energy*, Vol. 82, pp. 96-101 (2015).  
(査読有)  
DOI:10.1016/j.pnucene.2014.07.016
- ② Haruka Kikuchi、Toru Obara、  
“Development of Transient Analysis Code for Estimation of Total Released Energy in a Two-Fuel-Solution-Tank System”、*Annals of Nuclear Energy*, Vol. 87, pp. 486-493 (2016). (査読有)  
DOI:10.1016/j.anucene.2015.09.027
- ③ Delgersaikhan Tuya and Toru Obara、  
“Supercritical kinetic analysis in simplified system of fuel debris using integral kinetic model、” *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 91, pp. 59-64 (2016). (査読有)  
DOI:10.1016/j.anucene.2016.01.003

[学会発表] (計9件)

- ① Haruka Kikuchi、Toru Obara、  
“Transient Analysis in Super Critical Condition for Several Fuel-Solution Tanks System with Different Layout、  
“*Proc. of PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, September 28 - October 3, 2014, on CD-ROM* (2014).
- ② Toru Obara、Delgersaikhan Tuya、Haruka Kikuchi、” Fission Probability Density Functions for Super Prompt Criticality Accident Analysis in Weakly Coupled Systems by Integral Kinetic Model”、  
*Proceedings of ICONE-23, 23th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE23-1618, May 17-21, 2015, Chiba, Japan, on CD-ROM* (2015).
- ③ Delgersaikhan Tuya、Haruka Kikuchi、Toru Obara、 “Application of Integral Kinetic Model to Transient Analysis of Different Types of Weakly Coupled Systems”、  
*Proceedings of ICONE-23, 23th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE23-1626, May 17-21, 2015, Chiba, Japan, on CD-ROM* (2015).
- ④ Toru Obara、 Hiroki Takezawa、Delgersaikhan Tuya、 “PROMPT SUPERCRITICAL KINETIC ANALYSIS WITH NEUTRON COUPLING BETWEEN FUEL DEBRIS”、  
*Proceedings of International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC2015)、Charlotte, North Carolina, USA, September 13-17, 2015, pp. 1431-1438* (2015).
- ⑤ Delgersaikhan Tuya、Hiroki Takezawa、Toru Obara、 “Statistical Uncertainty in Kinetic Analysis using Integral Kinetic Model for Re-criticality Accident in Weakly-Coupled Fuel Debris”、  
日本原子力学会2016年春の年会予稿集、2016年3月26日～28日、東北大学川内キャンパス、1013 (2016).
- ⑥ 菊池遼、小原徹、 “弱結合体系における臨界安全過渡解析に関する研究 (3) 2タンク体系での溶液組成及び幾何形状の効果”、  
日本原子力学会 2015 春の年会予稿集、2015 年 3 月 20 日～22 日、茨城大学日立キャンパス、J26 (2015).
- ⑦ 小原徹、Delgersaikhan Tuya、 “積分

型動特性モデルを用いた溶融デブリの臨界事故解析 (1) 研究概要と解析手法”、  
日本原子力学会 2015 春の年会予稿集、2015 年 3 月 20 日～22 日、茨城大学日立キャンパス、J23 (2015).

- ⑧ Delgersaikhan Tuya、Toru Obara、 “The Criticality Accident Analysis of Melted Debris by Integral Kinetic Model (2) Preliminary Analysis for Two-Unit System”、  
日本原子力学会 2015 春の年会予稿集、2015 年 3 月 20 日～22 日、茨城大学日立キャンパス、J24 (2015).
- ⑨ Delgersaikhan Tuya、Toru Obara、 “Kinetic Analysis of Re-criticality Accident in Simplified System of Fuel Debris and Consolidated Fuel”、  
日本原子力学会 2015 年秋の大会予稿集、2015 年 9 月 9 日～11 日、静岡大学静岡キャンパス、A22 (2015).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小原 徹 (OBARA、Toru)

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授  
研究者番号：40221858

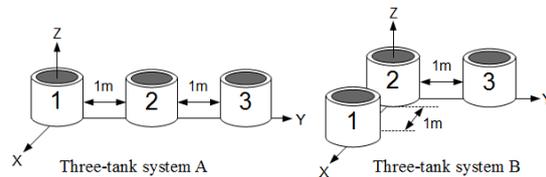


図1 複数の核燃料溶液タンクの解析体系 (学会発表①から引用)

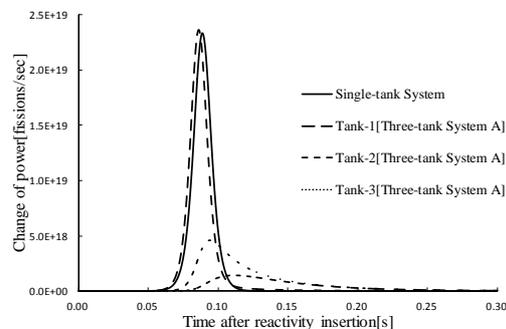


図2 超臨界後の出力変化解析結果 (System A) (学会発表①から引用)

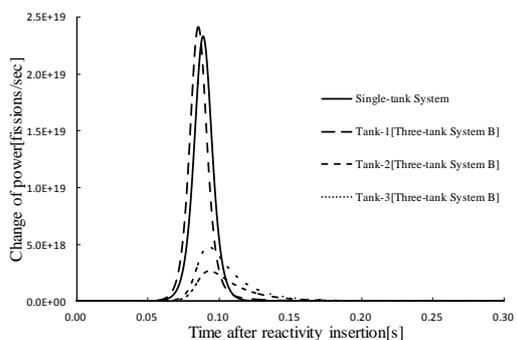


図3 超臨界後の出力変化解析結果(System B)  
 (学会発表①から引用)

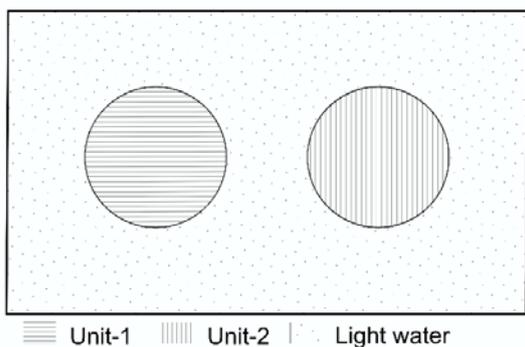


図4 二つの粒子状のデブリの球からなる体系  
 (学会発表③から引用)

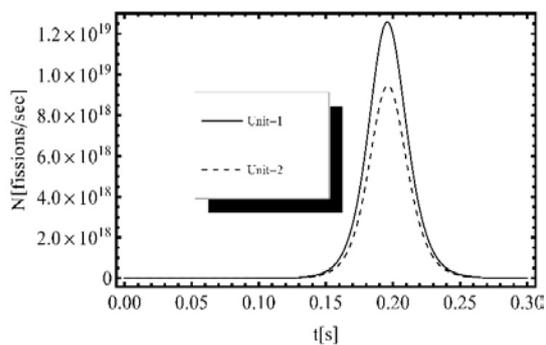


図5 二つの粒子状のデブリ球からなる体系での解析結果  
 (学会発表③から引用)

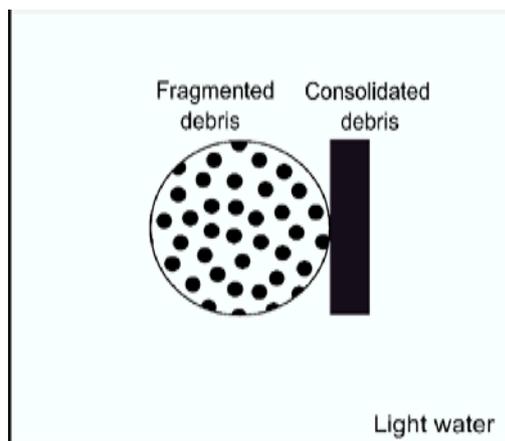


図6 粒子状デブリと塊となったデブリからなる体系  
 (学会発表④から引用)

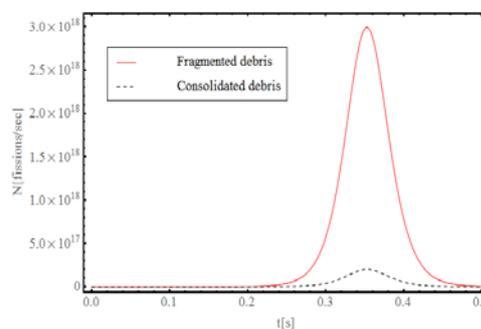


図7 粒子状デブリと塊となったデブリからなる体系  
 (学会発表④から引用)