

博士(工学) 張 智剛

学位論文題名

An Experimental Study on Fragmentation of  
a Single Molten Metal Droplet Penetrating a Sodium Pool

(ナトリウムプールに侵入する单一溶融金属液滴の破碎に関する実験研究)

学位論文内容の要旨

Sodium-cooled fast breeder reactor (SFBR) technologies are regarded as a cost-effective means of increasing energy demands in low  $CO_2$  emission society required in the 21st century. There have been more than 300 reactor-years of SFBR experience over five decades and in seven countries. SFBRs with superior breeding ratio and sufficient burnup capability including long-life radioactive materials can utilize uranium at least 60-times more efficiently than normal reactors.

For the development of SFBRs, the reactor core safety is always an important problem. The progression of core disruptive accidents (CDAs) in metallic fuel SFBRs is strongly affected by the exclusion of molten core materials from the core region due to the molten fuel-coolant interaction (FCI) and structural material-coolant interaction (SCI). The major initiators of CDAs are anticipated transients without scram (ATWS) and its typical events are unprotected transient overpower (UTOP) and unprotected loss of flow (ULOF). Although the high thermal conductivity and good passive shutdown potential of metallic fuel SFBRs determine a quite low probability of CDAs, it is indispensable to evaluate the possibility of positive reactivity feedback, which is the neutronically and thermal-hydraulically coupled feedback, in the progression of CDAs. If an appropriate quantity of molten core materials ejected from the damaged fuel pins is excluded from the core region and is finely fragmented, CDAs will terminate due to the insertion of sufficient negative reactivity to the core. On the other hand, if molten core materials near their freezing points are solidified in the core region or in the lower plenum without fragmentation, the coolability of the core will deteriorate and the risk of re-criticality may arise, resulting in a more critical scenario. Therefore, for the termination of CDAs, the molten core materials are required to be passively discharged from the core region.

As mentioned above, it is necessary to fully investigate the possibility and fragmentation mechanism due to the FCI and SCI for core design concepts with passive safety even in CDAs. In order to characterize thermal and hydrodynamic effects in fragmentation of droplet, and the relationship between a single molten metal droplet and jet to predict the fragment sizes, the present thesis focuses on the fragmentation of a single molten metal droplet by using aluminum and copper as molten simulants of metallic fuel and structural material (304SS and 316SS) under a wide range of thermal and hydrodynamic conditions.

In chapter 1, the development of SFBRs, backgrounds of CDAs, previous experimental and research

works on the fragmentation of molten metal droplet and jet were summarized. Droplet or jet breakup of one fluid in another immiscible fluid with different density has been researched in many fluid divisions, but the fragmentation of a single molten metal droplet in a fluid with large temperature difference and phase change has not been researched enough, especially for liquid metal with high thermal conductivity and high boiling point as a coolant.

In chapter 2, in order to understand the fragmentation of the metallic alloy fuels in liquid phase formed by metallurgical reactions between metallic fuels and claddings with instantaneous contact interface temperature ( $T_i$ ) below and above the boiling point of sodium, the experimental results of a single molten aluminum droplet were reported. Intensive fragmentation of molten aluminum droplet was clearly observed even if  $T_i$  values are below the boiling point of sodium under relatively high ambient Weber number ( $We_a$ ) condition. When  $T_i$  is approximately higher than the boiling point, the intensive fragmentation of droplet was clearly observed independent of  $We_a$  condition. These results indicate the fragmentation of the metallic alloy fuels in liquid phase formed by the metallurgical reactions could possibly occur under the low  $T_i$  condition below and above the sodium boiling point.

In chapter 3, the possibility and mechanism of fragmentation of molten core materials due to FCI and SCI are verified, under the low ejection velocity condition because of low accumulation of fission products. Copper is used as a simulant of metallic fuels, and stainless steel is used as structural material at a low  $We_a$  and a wide range of superheat. Intensive fragmentations of single molten copper and stainless steel droplet were clearly observed even if the  $T_i$  values are below their melting points with a large supercooling. The intensive fragmentation shows that the mass median diameter ( $D_m$ ) values of molten droplet with the different mass of 5 times have the same level. It is also found that fragmentation characteristics of metal jets could possibly be evaluated conservatively by FCI and SCI of single molten droplet.

In chapter 4, under the high ejection velocity of the molten core materials because of high accumulation of fission products (high  $We_a$  condition), intensive fragmentation of single molten copper and stainless steel droplets with was clearly observed even under the lower  $T_i$  condition. Fragment size distributions of molten droplet with high  $We_a$  tend to be less than those with low  $We_a$  under the same thermal condition. With the increasing  $We_a$ , the hydrodynamic effect in fragmentation becomes predominant over thermal effect under the low  $T_i$  condition. It is also found that the  $D_m$  values in copper and stainless steel droplets with high  $We_a$  show the same level with that in 3kg-metallic fuel jet with high  $We_a$ .

As explained above, the possibility and mechanism of fragmentation of molten core materials due to FCI and SCI are verified by a series of experiments using the simulants of metallic fuels and structural material under a wide range of thermal and hydrodynamic conditions. In chapter 5, these conclusions are summarized, which are very useful for the development of safety evaluation codes in SFRBs.

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 杉山 憲一郎  
副査 教授 島津 洋一郎  
副査 教授 奈良林 直  
副査 教授 佐藤 正知

## 学位論文題名

### An Experimental Study on Fragmentation of a Single Molten Metal Droplet Penetrating a Sodium Pool

(ナトリウムプールに侵入する单一溶融金属液滴の破碎に関する実験研究)

持続可能な社会を構築するためには、現状の軽水炉技術よりウラン資源を 60 倍以上有効に利用できるナトリウム冷却高速増殖炉 (Sodium Cooled Fast Breeder Reactors :SFBRs) 技術の確立が重要である。本研究で対象とする金属燃料 SFBRs では、高い熱伝導率による炉心の熱膨張に加えて、炉心温度の上昇に応答する受動的な炉心停止システムを設けることにより炉心崩壊事故 (Core Disruptive Accidents:CDAs) の可能性は極めて低くなる。しかし、一層の SFBRs の社会受容性を計るために、発生確率が極めて低い、安全保護系が作動しない過渡的な出力上昇や冷却材喪失事故事象により CDAs が発生しても、想定内で CDAs が終息する炉心設計を追求すべきである。

本研究は、増殖性、安全性で優れている金属燃料 SFBRs の CDAs 進展時における、溶融燃料とナトリウム冷却材との相互作用 (Fuel - Coolant Interaction : FCI) と炉心構成材-ナトリウム冷却材との相互作用 (Structure Material - Coolant Interaction : SCI) に関する実験研究である。CDAs 時の炉心挙動はこの現象に強く影響を受ける。適当量の溶融燃料および溶融炉心構成材が FCI と SCI によって、適切な大きさの破碎片として炉心から流出・冷却されれば、CDAs 時の炉心に十分な大きさの負の反応度が挿入され事故は終息する。

このような観点から、CDAs 時に受動的に溶融燃料と溶融炉心構成材が破碎・流出される炉心構造を設計するためには、FCI・SCI が可能な条件、破碎片寸法および破碎メカニズム等を系統的に明らかにする必要がある。本研究では、金属燃料の破碎特性を理解できる金属としてアルミニウムと銅を採用し、炉心構成材として 304SS と 316SS を採用し、小質量、単一溶融金属滴を対象に金属滴の温度、落下速度を系統的に変えてナトリウムプール中での破碎実験を行っている。それらの結果は、熱力学的及び流体力学的パラメータである瞬時接触界面温度 ( $T_i$ ) と周囲ウェバー数 ( $We_a$ ) で整理され、従来報告されてい

る溶融金属滴および溶融金属ジェットの結果とも比較されている。その結果、瞬時接触界面温度があるレベル以上では、質量、落下形態に関係なく破碎片サイズが定まることが見いだされ、CDAs 時においても受動的安全性の高い炉心構造設計に大きく寄与する実験結果を得ている。

第 1 章では、SFBRs の開発動向、SFBRs における CDAs の特徴、溶融金属滴・ジェットの破碎に関する従来の実験および理論研究の概要が纏められている。高い熱伝導率と高い沸点を持つ溶融金属滴とナトリウム冷却材を対象とする、密度が大きく異なり、大きな温度差が存在し相変化が生じる系の研究は極めて限られており、系統的実験研究は学問的にも実用的にも重要であることが述べられている。

第 2 章では CDAs 時に金属燃料と被覆材の共晶反応により形成される可能性がある低融点金属滴の破碎挙動を明らかにする目的で行われた溶融アルミニウム滴の実験結果が報告されている。 $T_i$  がナトリウムの沸点より充分低い領域では、低  $We_a$  条件下では効果的な破碎は生じないが、 $T_i$  が沸点近傍あるいは充分高い領域では、 $We_a$  の領域に関係なく流出・冷却上好ましい効果的な破碎が生じることを報告している。これらの結果は、共晶反応によって作られる液相の合金滴の破碎がナトリウム沸点以下および以上においても期待できることを示唆している。

第 3 章では、溶融銅と溶融ステンレス鋼の单一滴の破碎に注目し、広い  $T_i$  領域に対して燃焼度が低く核分裂性ガスの蓄積が低い、低放出速度(低  $We_a$ )となる条件下での FCI と SCI の可能性と破碎メカニズムが確認されている。得られた破碎寸法(質量中央値: $D_m$ )は、5 倍の質量を持つ断続的なジェット・滴系と同じレベルであり、落下形態の差に依存していない。加えて、質量が 2 枠異なる金属ジェットの破碎特性が单一溶融金属滴の FCI と SCI データによって評価できことをも分かった。また、本章では、大きな過冷却度で効果的な破碎生じることも明らかにしている。

第 4 章では、燃焼度が進み核分裂性ガスの圧力が高く、高放出速度(高  $We_a$ )の条件となる溶融銅・ステンレス鋼滴の実験結果が報告されている。第 3 章の結果に比較して、低  $T_i$  条件下でも効果的な破碎が観察されること、高  $We_a$  条件下での破碎片サイズ分布( $D_m$ )は低い  $We_a$  領域の最小値より低くなる傾向があり、かつ、 $T_i$  条件に影響されないことを明らかにしている。さらに、高い  $We_a$  の銅・ステンレス鋼の  $D_m$  値は質量が 3 枠大きい高  $We_a$  の金属燃料ジェット(3kg)および同じ質量レベルのジェットの値と十分な一致を示すことを報告している。これらの実験事実は学術的に重要な知見であることは言うに及ばず、炉心構造設計および安全評価コード開発にも極めて有用である。

第 5 章は結論で、これらの実験事実がまとめられている。

これを要するに、著者は、金属燃料ナトリウム冷却高速増殖炉の事故時炉心安全性の新知見を得たものであり、原子力安全工学に対して学術的に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。