

[H27-05]

Table 2.1 Experimental cases

	Time (s)	Average temp. (K)	σ	Width of B ₄ C region (mm)
Case 1 L	700–3000	1477	16.21	4.0
Case 1 R	700–1500	1458	2.51	4.0
	1500–4500	1472	6.11	
Case 2 L	250–1500	1455	19.37	2.0
Case 2 R	250–1500	1464	15.52	2.0

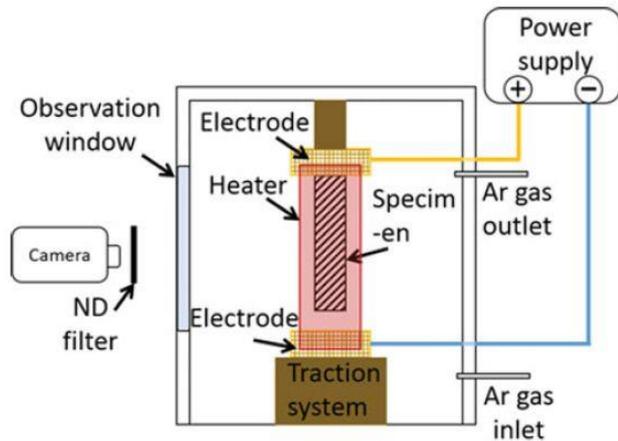


Fig 2.2 Schematic of experimental apparatus

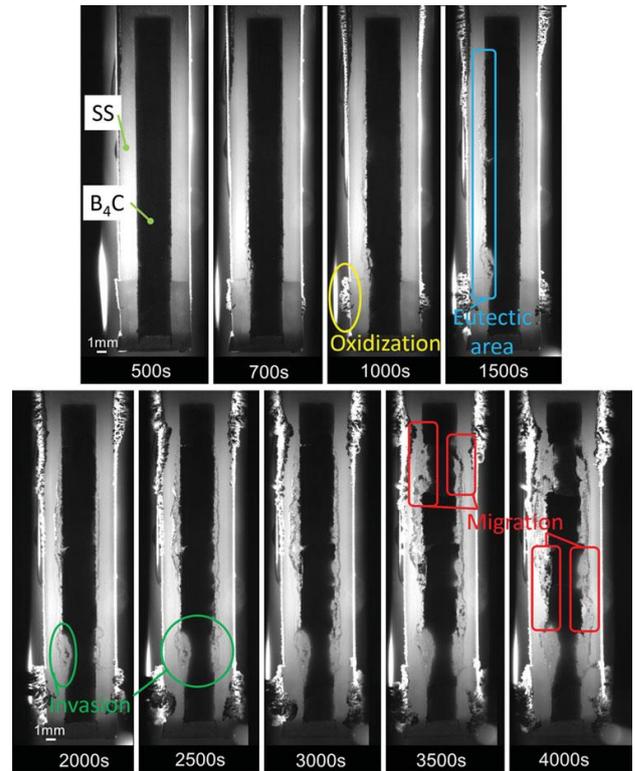


Fig. 2.3 Eutectic invasion in Case 1

2.2 可視化試験の結果

Case 1 における共晶溶融の様子を Fig. 2.3 に示す。試験片の外側においては酸化反応性生物が成長しているのが観察される一方で、B₄C と SS の境界では共晶溶融している範囲が拡大している様子が確認できる。また、共晶溶融液の中に B₄C 粉末が流れ出して移動している様子が観察された。カメラ観察により得られた共晶溶融時の画像に画像処理を施し、Fig. 2.4 のように共晶液が存在する部分とそれ以外の部分に区別し、共晶液が存在する部分の面積を測定することにより共晶による侵食速度を評価した。Fig 2.5 にそれぞれのケースに関する侵食速度のプロットを示す。また、Fig 2.6 に既存研究との比較を示す。既存研究により示された溶融速度と無矛盾な結果が得られていることが確認された。

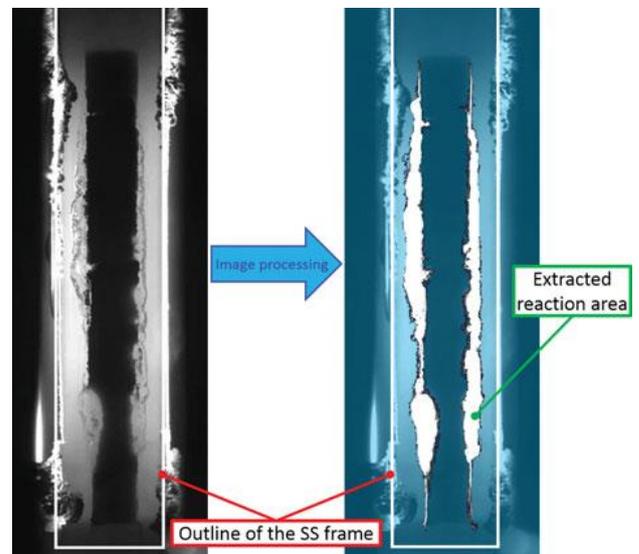


Fig 2.4 Image processing to detect eutectic area

[H27-05]

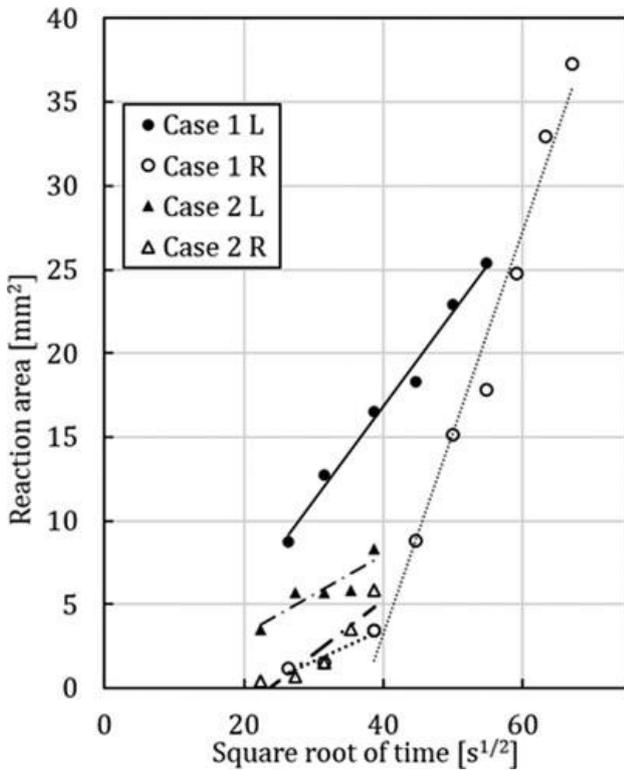


Fig. 2.5 Reaction area relative to the square root of time

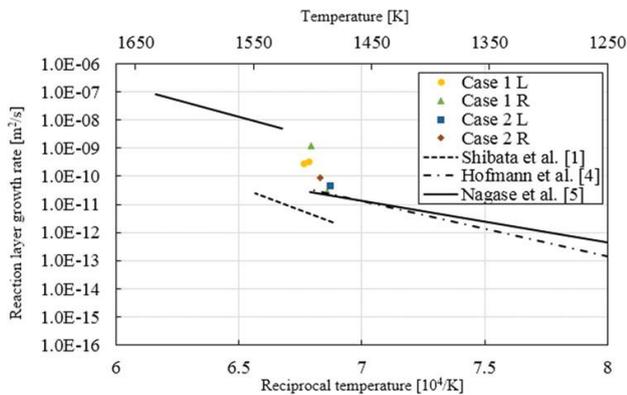


Fig. 2.6 Arrhenius plot of the reaction rate constants for the B4C powder experiments

3. 圧力抑制室における温度成層化現象[2]

3.1 目的

本研究では、福島第一原子力発電所の事故の事象進展評価に大きな影響を与える温度成層化現象について実験的研究を実施した。温度成層化現象の発生を支配するパラメータとしてリチャードソン数が提案されている。このため、実機と同じノズル径を用いた凝縮実験を実施し、評価を実施する。

2.2 実験装置

Fig. 1 に本研究で使用した、円筒型タンクを用いた蒸気凝縮実験装置の概要図を、装置の写真を Fig. 2 に示す。φ146cm x 240cm の円筒型の不透明プラスチック製タンクをプールとし、3号機の排気管と同じ穴径をもつスパージャーを用いた。スパージャーとボイラーをつなぐ配管にニードルバルブを設置し、このニードルバルブにて蒸気流量を調整した。タンクの側面に観察窓を取り付け、スパージャーにて発生する蒸気泡を高速カメラで撮影した。Table 1 に実験で用いた蒸気条件をまとめる。

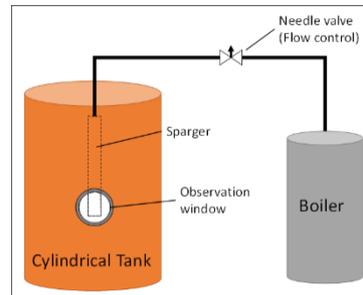


Fig.1 Test Section Fig.2 Photograph of Tank

Table 1 蒸気条件

	蒸気条件 [g/s]	質量流束 [kg/m2s]	実機条件 [kg/m2s]	Scaling factor
Test 1	6.7	14	16	0.88
Test 2	26	52	53	0.98

2.3 実験結果

Fig. 3 に、実機条件における蒸気泡画像を示す。それぞれの画像中の蒸気泡は、その温度における平均的な大きさの蒸気泡となっている。実験の結果、全てのケースでプール水温度が高くなるにつれて蒸気泡が大きくなることが確認された。また、蒸気泡の形は楕円球に近く、楕円の鉛直方向の軸と比較して、プール水温度が低い時には楕円の水平方向の軸は短く、プール水温度が高い時には長くなる傾向が確認された。ただし、この画像には球または楕円球に近い、平均的な大きさ蒸気泡を採用しており、実験をとおして確認された蒸気泡は、形や大きさにはかなりばらつきがある。特に各ケース、プール水温度が比較的低い時の蒸気泡は、スパージャーの穴のふちの部分から円環に近いかたちで蒸気泡が発生し、次第に中心部も膨らむ傾向があった。これは、1 つ前の蒸気泡が消滅する際、凝縮によってわずかにプール水が逆流し、逆流が完全に止まる前に次の蒸気泡が発生し始めることにより生じている様子であった。

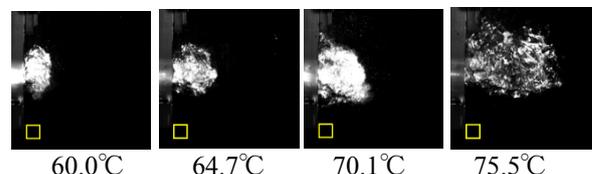


Fig. 3 蒸気泡画像の例 (黄色の四角は 1mm x 1mm)

[H27-05]

Fig. 4 に Test 1 と Test2 の蒸気泡長さと蒸気泡の生成周波数測定結果を示す。いずれのケースでも蒸気泡長さは、サブクール度が減少するに従い増加する傾向が確認された。蒸気泡の生成周波数はサブクール度 50°C 付近にピークを持つカーブとなった。

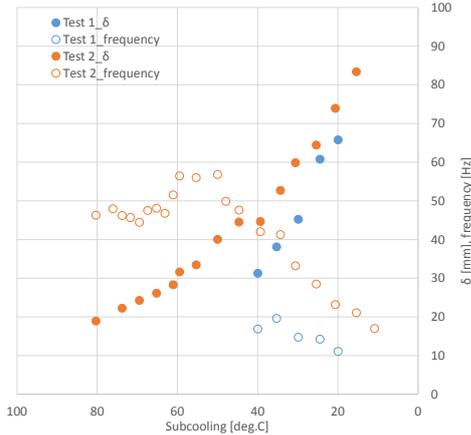


Fig. 4 蒸気泡径と発生周波数

得られた実験データを、モデル[1]と比較する。定量的な一致はむつかしいが、周波数にピークを持つという事や、サブクール度が小さくなるにつれて大きさが大きくなるという傾向が、特にサブクール度の小さい部分でよく一致した。これらのことから、モデルが実験データをよく表していることが分かった。これらのデータをもとに、リチャードソン数を修正することで、温度成層化の発生を、定量的に表すことができるようになった。

4. $^{90}\text{Sr}^+$ イオンの個別観測

4.1 試験体系

Fig. 4.1 に実験系の概念図を示す。 ^{90}Sr 試料として、日本アイソトープ協会の放射能標準溶液を用意した。この溶液を 400 μl (約 48.6 kBq) 分取してチタンフィルムに塗布し、真空チェンバーの黒鉛炉にセットした。試料調製は管理区域のフード内で実施した。黒鉛炉を 1000°C 程度に加熱してチタンとの酸化還元反応により ^{90}Sr 原子蒸気を発生させ、2 本のレーザー光 (波長 460.9 nm 及び 405 nm) を用いて ^{90}Sr 原子を同位体選択的に共鳴イオン化した。 $^{90}\text{Sr}^+$ イオンを四重極フィルターで質量分離した後、Fig. 4.1 右側のトラップ領域に導入した。トラップ領域において、圧力 10^{-4} Torr 程度のヘリウムガスを中心部に局所的に供給することで、 $^{90}\text{Sr}^+$ イオンをヘリウムとの衝突により常温程度まで減速させて捕獲した。その後、2 本のレーザー光 (波長 421.7 nm 及び 1091.8 nm) を用いて $^{90}\text{Sr}^+$ イオンのレーザー冷却を行った。ヘリウムガスを排気して、最終的に結晶化した $^{90}\text{Sr}^+$ イオンからの波長 421.7 nm 蛍光を倍率 5 倍のレンズを通して光電子増倍管 (PMT) 及び EMCCD カメラにより

観測した。

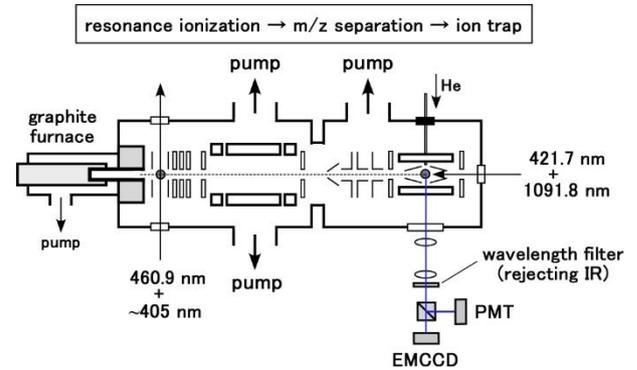


Fig. 4.1 Schematic of the experimental setup

4.2 試験結果

Fig. 4.2 に EMCCD カメラで観測した $^{90}\text{Sr}^+$ イオン結晶からの蛍光画像を示す。カメラの露光時間は 1 秒とした。今回の実験では計 5 個の $^{90}\text{Sr}^+$ イオンが観測され、単一イオンレベルでの可視化を実証した。イオン間隔は、トラップ領域のポテンシャル形状及びイオン間のクーロン斥力に依存し、本セットアップでは 20-30 μm 程度と得られた。単一イオンからの蛍光の明るさに違いが見られるが、これは EMCCD カメラと各 $^{90}\text{Sr}^+$ イオンとの位置関係によるものである。EMCCD カメラから見て遠くにトラップされた $^{90}\text{Sr}^+$ イオンからの蛍光は相対的に暗く観測される。また、421.7 nm 及び 1091.8 nm のレーザー波長は静止した $^{90}\text{Sr}^+$ イオンが共鳴吸収するように微調整されており、カメラの露光時間 1 秒の間にわずかでも $^{90}\text{Sr}^+$ イオンがトラップ軸方向に動いてしまうと、ドップラー速度の関係で $^{90}\text{Sr}^+$ イオンからの蛍光量は小さくなる。

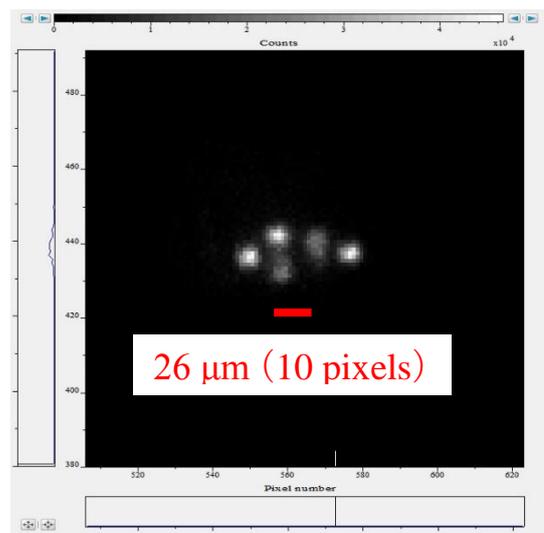


Fig. 4.2 Observed $^{90}\text{Sr}^+$ ion crystals

[H27-05]

5. おわりに

5.1 制御棒材料の共晶熔融

超高温環境下の共晶反応可視化手法を構築し、制御棒材料の熔融落下現象を可視化した。具体的には、B4C/SS 共晶反応可視化のための実験システムを構築し、板状試験体を用いて熔融挙動を可視化した。

5.2 圧力抑制室における温度成層化現象

圧力抑制室における温度成層化に関連して、実機と同じノズル径を用いた凝縮実験を実施した。また実験データをもとに、リチャードソン数を修正することで、温度成層化の発生を、定量的に表すことができるようになった。

5.3 ストロンチウム 90 の迅速分析

共鳴イオン化とイオントラップを組み合わせた⁹⁰Sr 分析装置を開発し、日本アイソトープ協会の⁹⁰Sr 標準試料を用いて⁹⁰Sr⁺単一イオンの可視化を行った。

参考文献

- [1] Shota Ueda, Hiroshi Madokoro, Byeongnam Jo, Masahiro Kondo, Nejdet Erkan and Koji Okamoto, Dynamic visualization of eutectic reaction between boron carbide and stainless steel, Journal of Nuclear Science and Technology 54(1), 81-88 (2017)
- [2] 山内大典, 「圧力抑制室における温度成層化現象の発生と消滅のメカニズムに関する研究」, 東京大学工学系研究科博士論文 (2016)