

## (2) 中性子ラジオグラフィーによる核融合炉ブランケット模擬体の内部観察

核融合科学研究所 田中 照也

京都大学・  
エネルギー理工学研究所 八木 重郎、向井 啓祐

近畿大学・原子力研究所 山西 弘城

### 1. 目的

核融合科学研究所では核融合炉発電ブランケットシステムの開発研究のために、冷却材候補である高温の熔融塩(FLiNaK、融点454℃)及び液体金属(LiPb、融点 235℃)を循環させるループ試験装置(熱・物質流動ループ装置Oroshhi-2 (図1)[1,2])を運用し、様々な要素技術の検証実験を進めている。この高温冷却材を循環させる実験装置では、液体の体積膨張を吸収するための膨張タンクや、流速や圧力損失を測定するための枝管部分に自由液面部分が存在し、これら液面高さは液面に接するArパージガスの圧力調整によって適切に制御する必要がある。しかし、実際の実験時には、特に径の細い枝管部分で自由液面が過渡的に基準高さ以上に上がり、枝管の低温部で固化するという事象が生じている。また、冷却材が高温用バルブの駆動部分にわずかに入り込んで固化し、バルブの開閉がしづらくなる状態も経験している。核融合炉用冷却材の適切な循環技術を蓄積していく上では、複雑な配管や各種機器内における冷却材存在位置の評価手法の確立が重要となる。

本課題では、ブランケット用冷却材を固化させた試料やステンレス等の金属配管材料等を対象として、近畿大学原子炉照射による中性子ラジオグラフィー像の取得を行う。材料組み合わせによるコントラストの違い、空間分解能、観察可能な試料厚みなどについて調べ、ブランケット実験機器やブランケット構造模擬体内部の透過観察手法としての適用性を調べる。

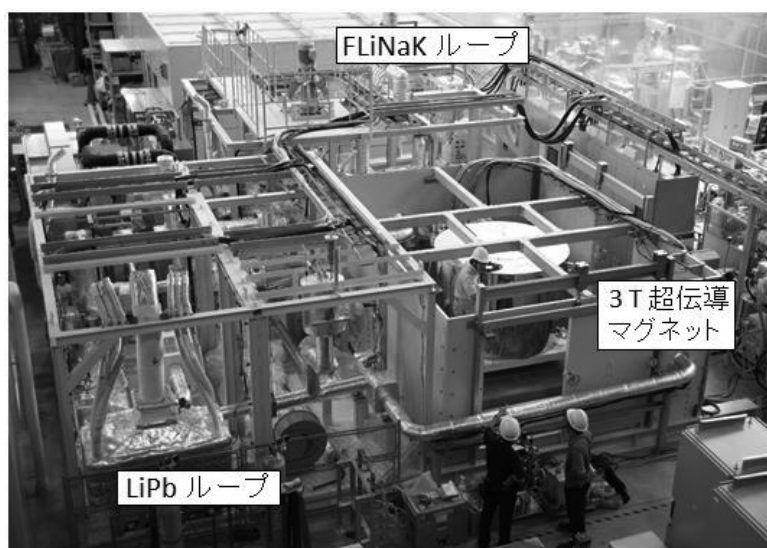


図1. 核融合ブランケット技術共同研究プラットフォーム 熱・物質流動ループOroshhi-2 [1, 2]

## 2.実施した実験と結果

### 2-1. 熱中性子ラジオグラフィー像の取得

本研究グループにとって初めての近大炉における中性子ラジオグラフィー測定となるため、試料設置可能空間や測定機器、手順の確認も目的として、室温で固化状態の熔融塩FLiNaK(46.5 LiF-11.5 NaF-42KF)、液体金属LiPb(15.7Li-84.3Pb)、ステンレス製真空フランジ等に対するラジオグラフィー像の取得を行った。15分の中性子照射後にイメージを読み取った結果を図2に示す。特に、図2(b)に示すように、厚み13mmのステンレスフランジ上に厚み5mmのLiPbや粉末状のFLiNaKを載せた場合にも、各材料の配置が読み取れ、冷却材循環装置の配管内で固化した冷却材等の分布確認に有効であることが確かめられた。今回取得した試験画像データ及び今後実施するMCNPコードを用いた中性子輸送計算とイメージングプレートにおける反応率計算から、判別可能な配管内冷却材層の最小厚み等の検討を進めていく。

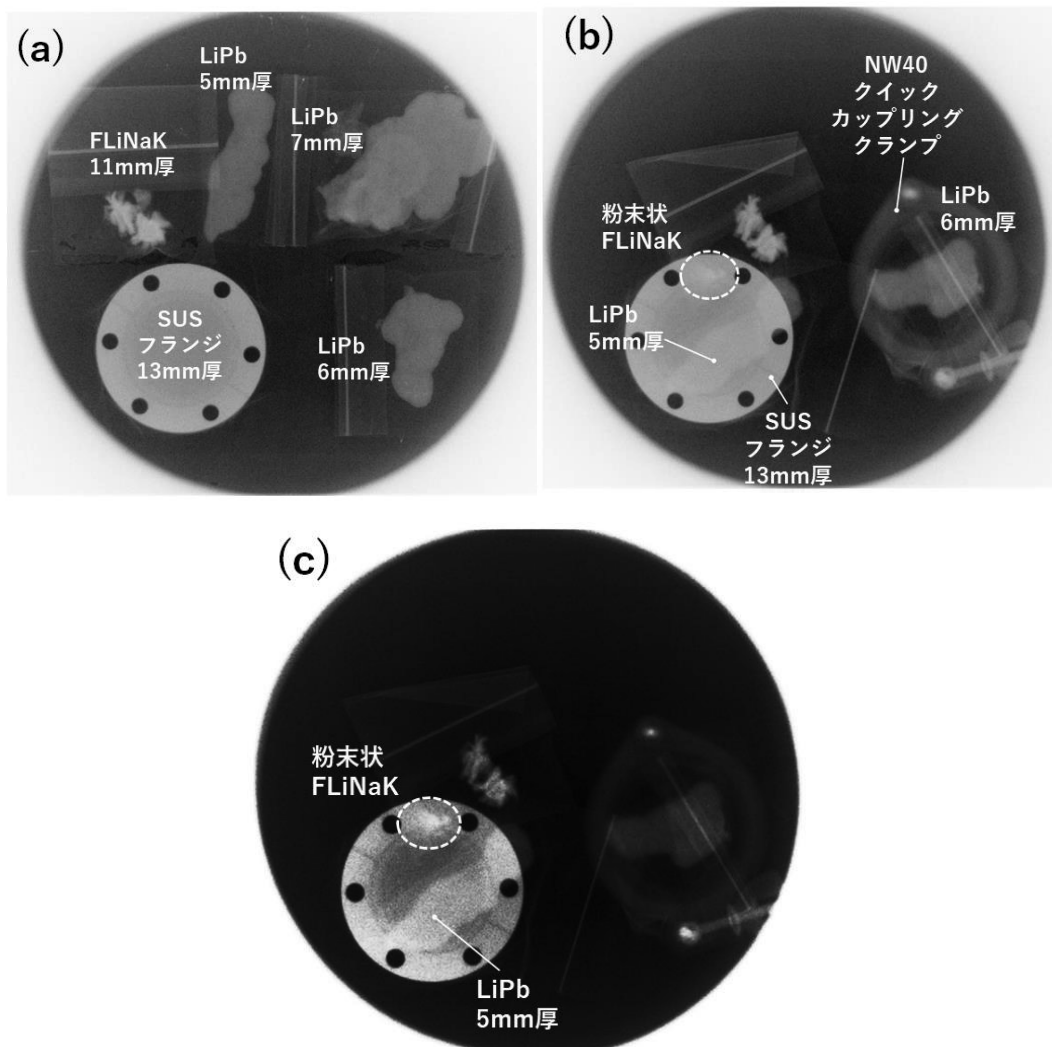


図2. 中性子用イメージングプレートで取得したブランケット冷却材の透過像

(a): 試験試料の個別像、(b): SUSフランジに重ねて設置した際の像、(c): (b)のコントラスト調整後

## 2-2. 閾値反応を利用したラジオグラフィ像の取得の試み

現在使用している実験装置の配管や機器内の冷却材の存在位置を評価する目的に対しては、熱中性子を利用したラジオグラフィ手法で十分に対応できる可能性が高い。一方、核融合炉で使用される発電ブランケットモジュールは厚みが30-60cmと分厚く、その内部にはトリチウム燃料増殖させるためにリチウム(Li)を含んだ冷却材を循環させる必要がある(図3)。この分厚いブランケットモジュール内部を複雑に流れる冷却材の分布状態や、内部隔壁等の健全性の評価に中性子ラジオグラフィを適用する際には、 ${}^6\text{Li}$ の熱中性子吸収断面積が大きいことから、十分な量の熱中性子が透過することができず、内部状態の観察が困難になる可能性が高い。特に、多くの核融合ブランケット概念では、 ${}^6\text{Li}$ を天然の7.5%から90%に濃縮して使用する設計が示されている。

そこで、閾値反応により $\beta$ 崩壊核種を生成する元素を選択し、透過力の高い高速中性子によるラジオグラフィ実施の可能性について照射実験により調べた。実験では図3に示すように、 $\text{FeS}_2$ 粉末を塗布した板を測定対象試料の上において中性子を照射し、その後、 $\beta$ 線用イメージングプレートを用いて放出 $\beta$ 線強度分布の取得を試みた。S(硫黄)については、 ${}^{32}\text{S}$ (存在比95%)が約2.5MeV以上で0.1-0.3barnsの(n,p)反応断面積を有し、生成される ${}^{32}\text{P}$ が半減期約14日で平均0.69MeVの比較的高いエネルギーの $\beta$ 線を放出することから選択した。

令和1年度の実験では中性子を約1時間照射し、その後約1か月の間、 $\beta$ 線用イメージングプレートに接触させたのちに像の取得を試みたが、明確な像の取得には至らなかった。

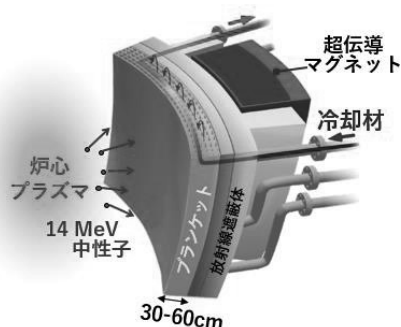


図3. 核融合ブランケット模式図

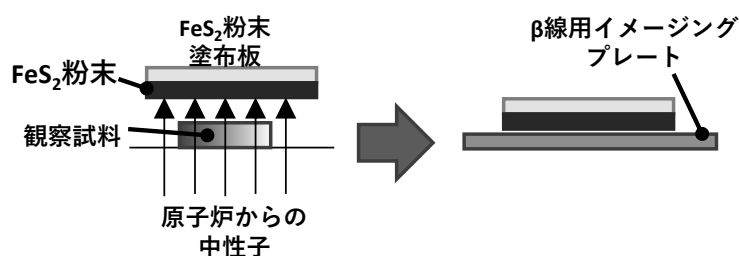


図4.  $\text{FeS}_2$ 粉末塗布板を用いた $\beta$ 線放出像取得の試み

## 3. $\text{FeS}_2$ の $\beta$ 線放出強度考察

文献3に示されている直径 20cmの照射プラグ上部における中性子スペクトルを誘導放射能計算コード FISPACT-II[4]に入力し、2 時間照射を行った場合の  ${}^{32}\text{P}$  の生成量及び放出 $\beta$ 線エネルギー量の計算を行った。図 5 に $\beta$ 線放出エネルギーの時間変化を示す。照射終了直後は  ${}^{56}\text{Mn}$  の $\beta$ 線放出エネルギー量が大きくなっているが、数時間後からは  ${}^{32}\text{P}$  からの $\beta$ 線放出が支配的になる。照射後 15 分の時点で、 $1\text{cm}^3$  の  $\text{FeS}_2$  には  $2 \times 10^4$  個の  ${}^{32}\text{P}$  が生成され、 $1.3 \times 10^{-18} \text{kW} = 8.11 \text{keV/s}$  の $\beta$ 線エネルギーが放出されている。照射後 1 か月間に放出される $\beta$ 線エネルギー総量は  $4.5 \times 10^7 \text{keV/cm}^3$  となる。

イメージングプレートに付与される $\beta$ 線エネルギー量については、放出された $\beta$ 線がイメージングプレートに到達するまでのエネルギー損失等を輸送計算により詳細に評価していく必要があるが、非常に簡略化した手順での予備的な考察を行った。 ${}^{32}\text{P}$ の放出 $\beta$ 線の平均エネルギー0.695MeVに対する飛程(飛程 $\times$ 密度)は約  $0.3\text{g/cm}^2$  となる[5]。 $\text{FeS}_2$ の密度を  $4.9\text{g/cm}^3$  とすると、この飛程に対応する層の厚みは約  $600 \mu\text{m}$  となる。 $\text{FeS}_2$ 塗布層の表面から  $600 \mu\text{m}$ の層で 1 か月間に放出される $\beta$ 線のエネルギー総量がイメージングプレートに付与されるとして粗く近似すると、その量は  $2.7 \times 10^6 \text{keV/cm}^2$  とな

る。ここで、資料[6]にイメージングプレートが検出し得るβ線エネルギー付与量の下限として、 $8 \times 10^5 \text{ keV/cm}^2$  といった値が挙げられている。照射時間が1時間程度の場合でも、 $\text{FeS}_2$  層に生成されるβ線エネルギー総量はこの検出限界よりも若干高い値と見積もられるが、さらに1か月のβ線測定期間中における潜像の減衰の影響等も考慮すると、今回の実験条件では検出可能量を下回っていた可能性がある。

#### 4.まとめ

核融合ブランケット開発研究に使用している実験機器内の冷却材存在位置を評価するための手法として、近大炉を用いた中性子イメージング手法の適用性を調べた。中性子用イメージングプレートを用いたラジオグラフィ像の取得では、分厚いステンレス層と重なった位置の溶融塩及び液体金属冷却材の分布が観察できていることから、実際の実験機器内の冷却材存在位置の観察に有効に利用できると考えられる。また、将来の分厚い核融合ブランケット構造体内部の観察への適用性を調べる目的で、高速中性子と閾値反応を用いたラジオグラフィ像の取得を行った。今回、 $\text{FeS}_2$  塗布板を用い、 $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$  反応で生ずる $^{32}\text{P}$  が放出するβ線分布像の取得を試みたが、明確な像の取得にはいたらなかった。放出β線のエネルギー総量がイメージングプレートの検出下限を下回っていた可能性があり、より詳細なβ線輸送計算、イメージングプレートの特性の把握、効率的なβ線放出元素の再検討等を進める必要がある。

#### 参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Science and Technology 68 (2015) 303-307.
- [2] T. Tanaka et al., Fusion Science and Technology 75 (2019) 1002-1009.
- [3] 小林喜弘他、「個人線量計校正用原子炉放射線場の中性子特性」、55, RADIOISOTOPES (2006), 515-524
- [4] M. Fleming et al., The FISPACT-II User Manual, UKAEA-R(18)001, 2018.
- [5] 放射線計測ハンドブック、日刊工業新聞社、1991年。
- [6] 森千鶴夫、「イメージングプレートによる極微量放射能分布の測定」、日本アイソトープ協会ホームページ(2020年7月確認)

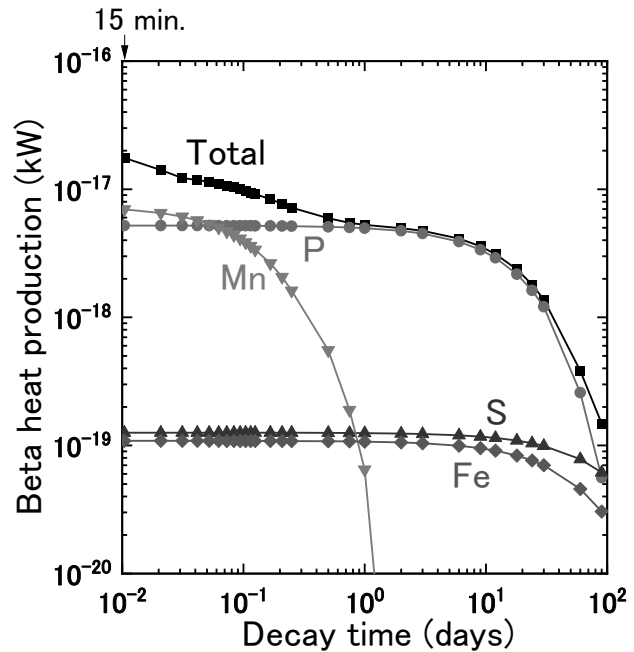


図5. 2時間照射後の $\text{FeS}_2$   $1 \text{ cm}^3$  (密度 $4.9 \text{ g/cm}^3$ )のβ線放出エネルギー量の変化