

## (2)核融合炉ブランケット模擬配管表面へ析出する腐食生成物の放射化分析

核融合科学研究所 田中照也、八木重郎

総合研究大学院大学  
物理科学研究科・核融合科学専攻 熊谷公紀、山崎 樂  
近畿大学・原子力研究所 山西弘城

### 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、ブランケット冷却材候補である高温の熔融塩(FLiNaK、 $\sim 500^{\circ}\text{C}$ )、及び、液体金属(LiPb、 $\sim 350^{\circ}\text{C}$ )を対象として様々な材料特性評価試験、循環技術試験、機器開発研究を実施している。これら高温冷却材を循環させるシステムでは、冷却材の腐食作用により配管表面から配管材料成分が時間とともに少しずつ溶出し、この溶出した成分は、冷却材に含まれて配管ループ内を循環するとともに、低温部や電氣的に安定となる場所の配管表面等に析出する。本課題では、核融合科学研究所で実施している各種冷却材特性評価実験や冷却材循環試験用の装置から取り出した金属・セラミック試験片に対して、原子炉照射およびGe検出器を用いた誘導放射能測定を実施し、それら表面に析出している元素と量の分析が可能であるかを調べる。また、実験装置内からサンプリングして取り出し、室温で固化させた冷却材(FLiNaK、LiPb)についても、原子炉照射と誘導放射能測定を実施し、冷却材中に溶け込んでいる不純物元素と濃度の分析を試みる。これら放射化分析により、核融合ブランケットの冷却材循環ループ内における材料腐食に伴う析出物や溶出成分の分布、挙動を明らかにすることが期待できる。

H29年度は、本原子炉の初めての利用であり、各種ブランケット材料の誘導放射能測定を個別に実施し、放出 $\gamma$ 線のスペクトル及び強度に関する基礎的なデータ取得を行った。

### 実験:

核融合ブランケット用に開発研究を行っている下記の候補材料[1]について、室温において3時間の原子炉照射を実施し、原子炉より取り出し後、誘導 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを高純度Ge検出器により測定した。各試料について、照射日当日、及び、翌日に約20分から8時間の測定を実施した。照射試料の重量は0.1-5gとした。

[ H29年度の照射試料 ]

- 構造材料:低放射化フェライト鋼JLF-1:Fe-9Cr-2W  
バナジウム合金NIFS-HEAT2:V-4Cr-4Ti
- 配管材料:インコネル600:
- 配管被覆材料:Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
CaZrO<sub>3</sub>
- 液体金属冷却材 LiPb(室温では固体、融点235 $^{\circ}\text{C}$ )
- 熔融塩冷却材 FLiNaK(室温では固体、融点454 $^{\circ}\text{C}$ )
- プラズマ対向耐熱材料: W
- その他の材料: Sn(冷却材LiSnの成分)

実験結果、及び、考察:

高純度Ge検出器で測定した各材料の $\gamma$ 線スペクトルの例を図1に示す。また、表1に、各試料の構成元素のうち、 $\gamma$ 線ピークが検出された元素を示す。

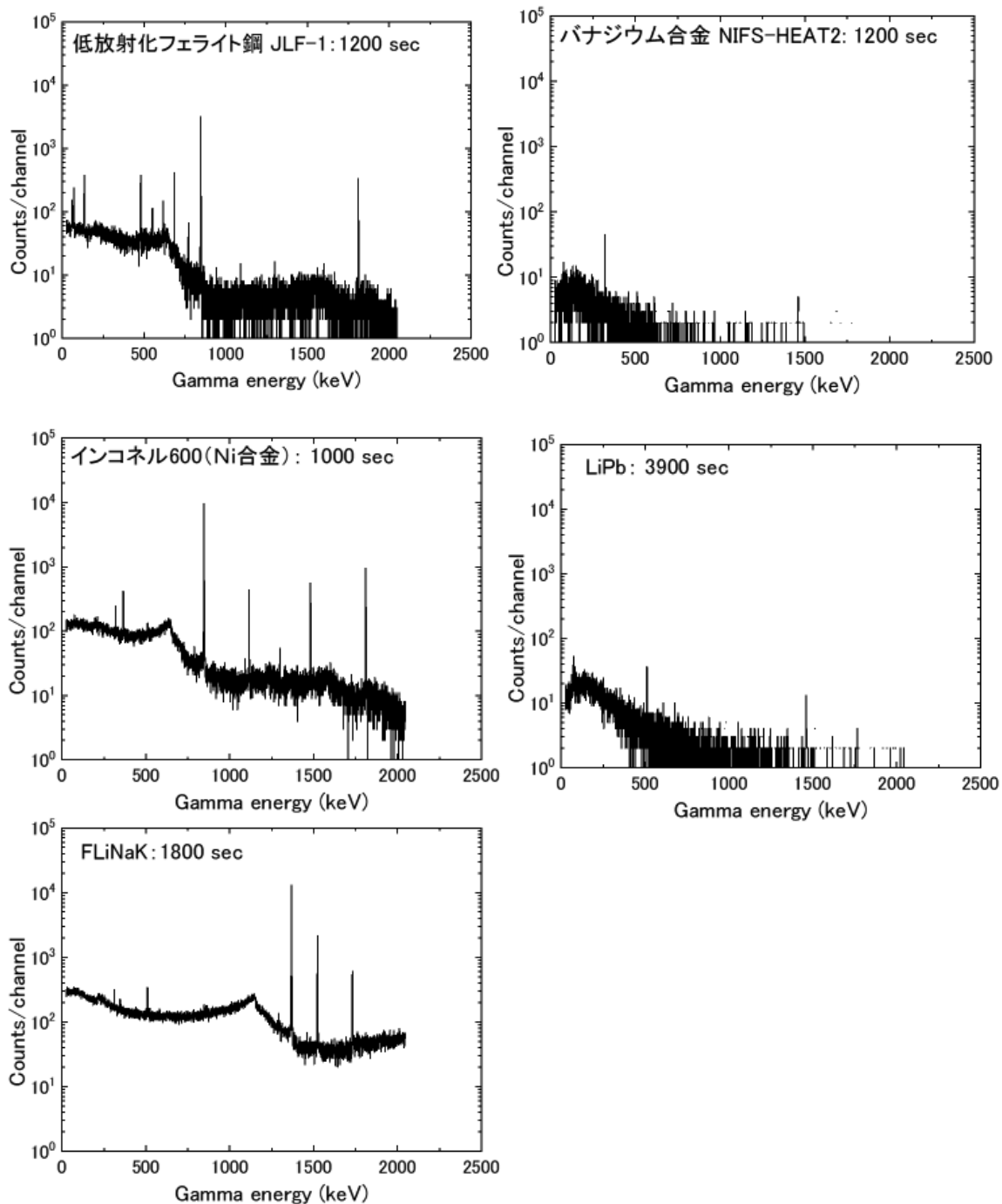


図1. 核融合ブランケット候補材料の原子炉照射後 $\gamma$ 線エネルギースペクトル測定結果例 (低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、インコネル600、LiPb、FLiNaK)

表1. 照射した核融合ブランケット候補材料と検出核種、及び、検出元素

材料名	主要構成元素(斜体は不純物) 下段:検出核種、上段:枠内が対応する元素
構造材料 低放射化フェライト鋼 JLF-1 (配管材料も兼ねる)	Fe (89wt%)、Cr (9.0wt%)、 <b>W (2.0wt%)</b> 、 <b>Mn(0.5wt%)</b> W-187、Mn-56
構造材料 バナジウム合金 NIFS-HEAT-2 (配管材料も兼ねる)	V(92wt%)、 <b>Cr(4wt%)</b> 、Ti(4wt%) Cr-51
配管材料 インコネル600	<b>Ni (min.72wt%)</b> 、 <b>Cr(14-17wt%)</b> 、Fe(6-10wt%)、 <b>Mn(1.0wt%)</b> Ni-65、Cr-51、Mn-56
配管被覆材料 Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>Er (40at%)</b> 、O (60at%) Er-171
配管被覆材料 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>Y (40at%)</b> 、O (60at%) Y-90m
配管被覆材料 CaZrO <sub>3</sub>	Ca (20at%)、 <b>Zr (20at%)</b> 、O (60at%)、 <b>Hf(不純物)</b> Zr-97、Nb-97、Hf-180m、Hf-181
液体金属冷却材 LiPb	Li (17at%)、Pb (83at%) -----
熔融塩冷却材 FLiNaK (LiF:46.5%、NaF:11.5%、KF:42%)	Li (23at%)、 <b>Na (5.8at%)</b> 、 <b>K (21at%)</b> 、F (50at%) Na-24、K-42
耐熱材料 W	<b>W (99.95wt%)</b> W-187
冷却材成分 Sn	<b>Sn (99.9wt%)</b> 、 <b>In(不純物)</b> Sn-123m、Sn-125m、In-116m

### 1. 配管表面への析出物分析の可能性

核融合ブランケット構造材料の候補である低放射化フェライト鋼、バナジウム合金については、ともに主成分であるFe、Vからの $\gamma$ 線は検出されず、主要添加元素のW、Crに起因する $\gamma$ 線ピーク、また、フェライト鋼についてはMn不純物起因と考えられるMn-56が検出された。ブランケット配管の候補材料であるインコネル600については主成分のNi、主要添加元素のCr起因の $\gamma$ 線ピークの他、Mn不純物起因と考えられるMn-56が検出された。これらの結果から、冷却材循環ループ内において、インコネル配管から腐食により冷却材中に溶出したNiが、同一ループ内の別の場所で低放射化フェライト鋼配管、もしくは、バナジウム合金配管表面に析出した場合には、切り出した配管壁面の放射化分析で析出量を評価できる可能性がある。また、低放射化フェライト鋼配管から溶出したWが、同一ループ内のバナジウム合金、もしくは、インコネル配管表面に析出した場合にも評価できる可能性がある。

3種類の配管被覆用セラミック材料、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaZrO<sub>3</sub>は、強磁場下で液体金属冷却材を循環させる際のMHD圧力損失を低減するため、また、高温の配管を循環する冷却材に含まれるトリチウム燃料が配管外に漏出するのを抑制するために、配管内部に数 $\mu$ ～数十 $\mu$ mの厚みで被覆を施すことが考えられており、その候補材料である。いずれの被覆材料も主成分であるEr、Y、Zrに起因する $\gamma$ 線ピークをとらえている。なお、CaZrO<sub>3</sub>の $\gamma$ 線スペクトルには、Zrに含まれるHf不純物起因と考えられる

Hf-180m、Hf-181のピークが観測されている。いずれの材料も主成分の検出が可能であることから、冷却材に被覆材料を長時間浸漬して行う健全性試験において冷却材に溶出し、さらに、同一ループ内の別の場所で金属配管表面に析出した際には、その部分を切り出して放射化分析を行うことで、析出量の分析が行える可能性がある。

## 2. 冷却材中への溶出元素分析の可能性

核融合ブランケットの冷却材候補である液体金属LiPbについては、短時間測定ではピークは観測されなかった。一方、熔融塩FLiNaKについてはNa、K起因の $\gamma$ 線ピークが観測されている。

長時間のブランケット冷却材循環試験や材料腐食試験後に冷却材を実験機器からサンプリングして取り出し、放射化分析を行うことで冷却材中に溶出した元素とその量を分析するという本課題のもう一つの目的の観点からは、LiPb冷却材の誘導 $\gamma$ 線の強度が弱かったことから、LiPb冷却材との組み合わせでの使用が想定される低放射化フェライト鋼から溶出するW、及び、バナジウム合金から溶出するCrについて評価できる可能性がある。また、配管被覆材料についても、いずれも主成分元素に起因するピークが比較的強いことから、LiPb冷却材中に溶出した被覆成分、もしくは、剥離して冷却材中に微粒子として混入する被覆成分の定量評価を行える可能性がある。

一方、熔融塩冷却材FLiNaKについてはNa及びKからの $\gamma$ 線が強いことから、FLiNaK冷却材との組み合わせでの使用が想定されるバナジウム合金から溶出するCrの検出は比較的強度が弱く、困難である可能性があるが、インコネルから溶出するNiについては $\gamma$ 線強度が比較的強く、評価できる可能性がある。また、FLiNaK冷却材中に溶出、もしくは、剥離して存在する被覆材料成分についてはいずれも定量評価を行える可能性がある。

その他、ブランケットのプラズマ対向面に被覆することが考えられている耐熱材料W、また、LiSn液体金属冷却材の主成分であるSnについても照射を行い、基礎データとして $\gamma$ 線エネルギースペクトルの取得を行った。Snについては、インジウム不純物起因と考えられるIn-116mのピークが観測された。

### H30年度の展開:

H29年度に取得した核融合ブランケット材料の照射後 $\gamma$ 線スペクトルの測定結果をもとに、配管表面に析出した腐食生成物の元素の定量分析、及び、冷却材中へ溶出もしくは微粒子となって混入した元素の定量分析が可能と考えられる材料の組み合わせについて、より詳細な検討を進める。また、析出量や溶出・混入量の分析が可能と考えられる材料の組み合わせについて、複数の材料を同時に照射し、より長時間の $\gamma$ 線エネルギースペクトル測定を行うことで、定量分析における測定限界の見通しを得る。

[1] 田中照也、乗松孝好、”小特集 液体だけど水じゃない～次世代ブランケット・ダイバータ研究開発の現状と課題～ 2. 液体ブランケット研究の現状”、プラズマ・核融合学会誌 92(2016)112-118.