

(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、冷却材とともにループ配管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、それら表面に析出する元素と量の分析が可能であるかを調べる。冷却材中に溶け込んでいる不純物元素の分析についても可能性を探る。

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 γ 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。H30年度は、引き続き、測定可能な析出物量の下限を調べる計画であったが、原子炉の利用が不可能となったため、研究計画を変更し、多岐にわたる核融合炉材料の中で原子炉を用いた放射化分析が可能な元素を解析により調べることにした。現在、開発研究を進めている主な核融合炉ブランケット用候補材料を図1に示す。

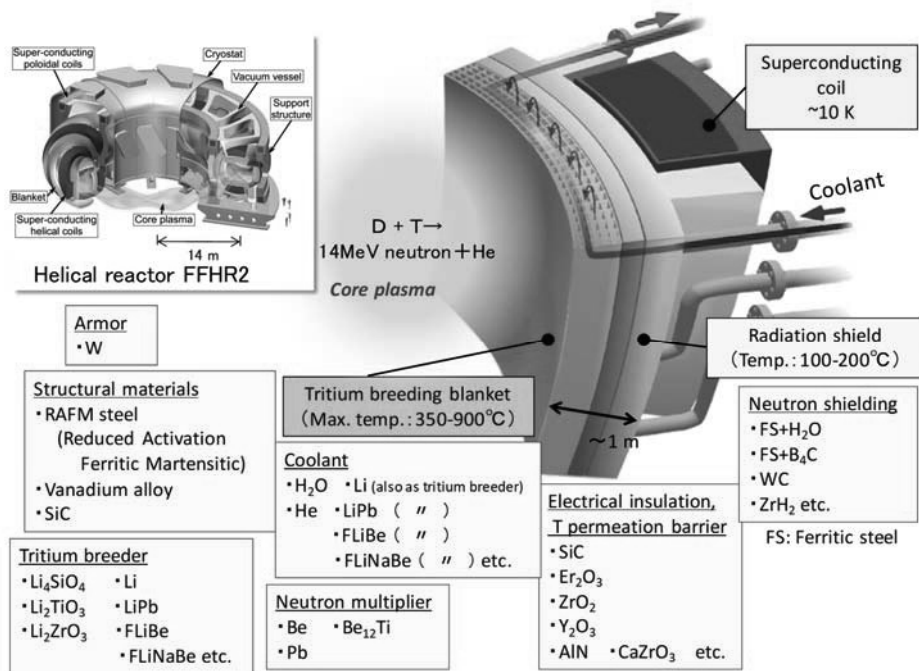


図1. 主な核融合炉ブランケット用候補材料 [1, 2]

解析方法

全元素を対象として、各元素 1gの原子炉照射後の誘導放射能を FISPACT-2005 コード[3]を用いて計算した。FISPACT コードに入力する中性子スペクトルは、原子炉等共同利用の手引き、図 11 をもとに 1eV 以下の熱中性子束が 1.2×10^7 n/cm²/s となるように再構成して用いた。また、本報告書の解析では、照射時間を3時間と仮定し、照射終了後 1.5 時間、または、3.5 時間冷却した後の誘導放射能を計算している。

次に、FISPACT コードの各元素に対する誘導放射能計算結果が記録されている出力ファイルから、照射終了後、1.5 時間、または、3.5 時間における放射性核種と核種ごとの放射能(Bq)値を抽出する。放射性核種が放出する γ 線・X線のエネルギー、及び、1崩壊当たりの強度のデータについては JENDL-DDF2015 [4]から検索して抜き出し、計算されている放射能(Bq)にかけ合わせることで、各元素 1gが原子炉照射後に放出する γ 線・X線のエネルギーと強度を算出した。

解析結果例

各元素 1gの原子炉照射終了後 1.5 時間における誘導放射能を計算した結果を図2に示す。この誘導放射能を計算では、水素(H)からフェルミウム(Fm)までの全ての元素1gに対して FISPACT コードによる誘導放射能計算を実施している。しかし、天然同位体が存在しない核種についてはエラーが生じるため(放射性同位体核種についても混合比を指定すれば誘導放射能計算が可能であるが、元素名を入力する通常の計算では天然比の組成に対して計算を行う。)、また、ウラン(U)等の元素は核融合炉材料開発研究では特殊な場合を除いて対象としないため、水素(H)からビスマス(Bi)までの計算結果例を図2に示している。横軸は γ 線・X線のエネルギーで 0-3000keV の範囲を線形スケールで、縦軸は各 γ 線・X線の放出数で 10^{-1} - 10^7 photons/s/g の8桁の範囲を対数スケールで描画している。

計算結果の中で特に強い γ 線を放出するのは、Mn, In, Eu 等であり、H29 年度に試験的に実施した核融合炉ブランケット用低放射化構造材料 JLF-1、及び、配管候補材料 Inconel600 の放射化測定では不純物として Mn が、冷却材候補の LiSn の成分である Sn の放射化測定では不純物として In が検出されている。また、比較的 γ 線強度が強い Hf についても、ブランケット用セラミック被覆候補材料 CaZrO₃の構成元素である Zr の不純物として検出されている。核融合炉ブランケットの候補材料構成元素の中では、Na, Ni, Er, W が比較的強い γ 線を放出し、また、Cr, Y, Zr, Sn についても γ 線強度は低くなるものの検出可能と考えられる。

図3(a)に、H29 年度、試験的に測定した低放射化フェライト鋼 JLF-1(主要構成元素 Fe:~89wt%、Cr:~9wt%、W:~2wt%、不純物として Mn~0.5wt%[5]) の照射後 γ 線エネルギースペクトルを示す。また、図 3(b)には、上記組成を模擬して FISPACT コードと JENDL-DDF2015 ライブラリデータから算出した 3 時間照射、3.5 時間冷却後の放出 γ 線・X線のエネルギーと強度を示す。実験では、計算で示されている W 及び不純物である Mn の強いピークが観測されており、その他の元素に起因する顕著なピークは見られていない。計算で示されている Cr に起因する γ 線・X線については、1200 秒の測定ではバックグラウンドの揺らぎに隠れており、より長時間の測定で観測される可能性がある。Fe に起因して放出される γ 線・X線の強度は図3(b)の描画範囲よりもさらに低くなっている。

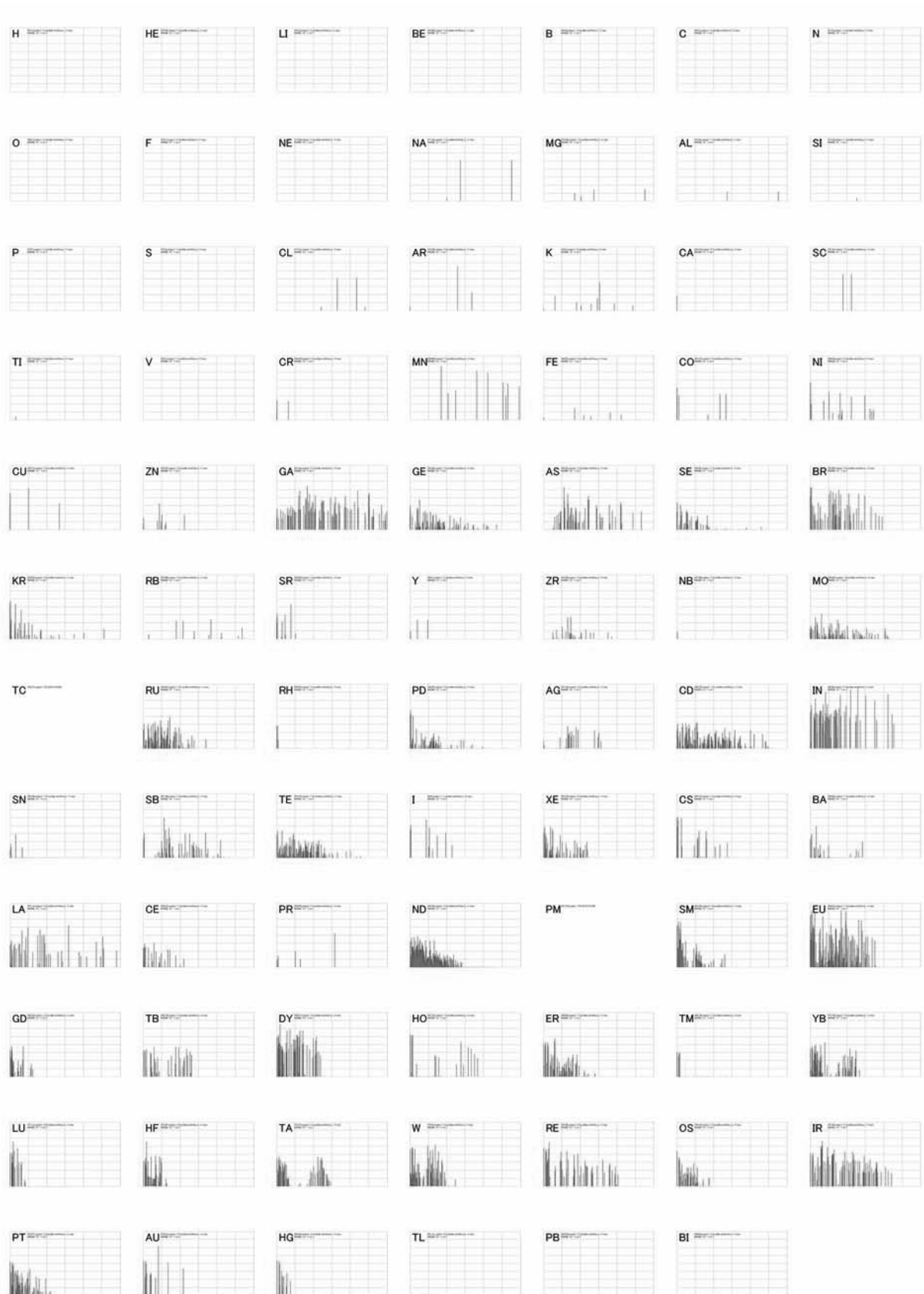


図 2. 各元素 1 g を 3 時間近大原子炉で照射した場合の照射後 1.5 時間における γ 線・X 線強度計算結果。横軸は γ 線・X 線エネルギーを線形スケールで 0-3000keV の範囲で描画。縦軸は各エネルギーの γ 線・X 線放出強度を対数スケールで 10^{-1} - 10^7 photons/s の範囲で描画。

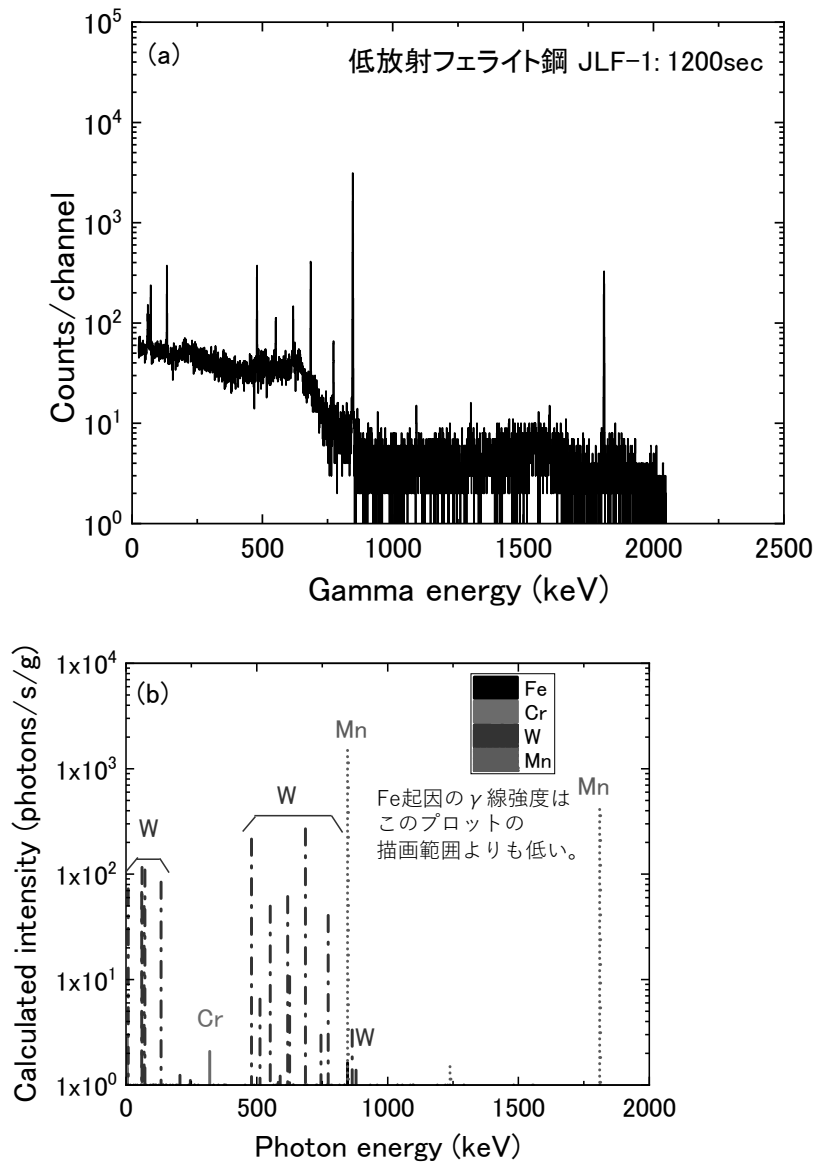


図3. (a) 近大炉照射後の低放射化フェライト鋼 JLF-1 の放出 γ 線エネルギースペクトル測定結果。(b) JLF-1 の主な構成元素を模擬して計算した放出 γ 線・X線の放出強度計算結果。(元素名は生成された放射性同位体の元素名ではなく、起因する入力材料。)

今後の展開

以上の繰り返し計算、また、計算結果の簡易描画は、本課題のために作成した Visual Basic プログラムを用いて実施しており、今後の照射・測定条件変更時や中性子スペクトルが異なる照射実験立案時の検討に利用していく。本課題で目的としている材料表面に付着した元素の放射化分析の可否について、より正確な検討を進めるためには、検出器の検出効率やエネルギースペクトル形状等の要素を組み込んだ計算が必要となるが、本年度の放出 γ 線・X線強度の算出のみでも、照射時間、冷却時間を变化させた際の応答変化を容易に検討でき、実験立案に適用できると考えられる。また、照射後に実際に測定された Ge 検出器のエネルギースペクトルの核種同定作業の迅速化が可能になる。

- [1] A. Sagara et al., Fusion Engineering and Design, 81 (2006) 2703-2712.
- [2] 田中照也 他, Journal of Plasma and Fusion Research, 92 (2016) 112-118.
- [3] R. A. Forrest et al., FISPACT-2005: User manual, UKAEA FUS 514.
- [4] J. Katakura et al., JENDL Decay Data File 2015, JAEA-Data/Code, 2015-030.
- [5] H. Tanigawa et al., Journal of Plasma and Fusion Research, 87 (2011) 167-171.