

氏 名 Zaixin Li

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1089 号

学位授与の日付 平成 19 年 9 月 28 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Benchmark study on neutronics performance of liquid  
blankets

論文審査委員	主 査 教授	相良 明男
	教授	室賀 健夫
	教授	富田 幸博
	教授	野田 信明
	教授	飯田 敏行（大阪大学）
	研究主席	西谷 健夫（日本原子力研究 開発機構）

Self-cooled Li and Flibe blankets with V-alloy structure are attractive concepts and considered for the LHD-type helical fusion reactor design FFHR. Maximum thickness allowed for blanket is 1.2 m in FFHR. Blanket functions such as heat removal due to 14 MeV D-T fusion neutrons, breeding of tritium fuel and radiation shielding must be fulfilled within this thickness.

To verify blanket functions, detailed neutronics investigations are required. One of the key options for Li and Flibe blankets is the use of neutron multiplier Be because, in spite of potential benefit of Be from neutronics aspects, there are some issues specific to Be such as irradiation effects. Thus it is necessary to evaluate quantitatively the impact of Be on tritium breeding ratio (TBR), radiation shielding and radio activation. For Li blanket, it is necessary to apply an electrical insulating coating e.g.  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , to reduce the magneto-hydrodynamic (MHD) pressure drop when Li flows in a strong magnetic field. However, neutronics investigation on the effect of  $\text{Er}_2\text{O}_3$  is scarce.

To provide the reactor design with viable data, the neutronics analysis procedure including transport and activation codes and nuclear libraries applied to liquid blankets need to be examined and, if necessary, improved. For this purpose, benchmark studies with systematic comparison of calculations and experiments are necessary.

The objectives of the present study are:

- A) To investigate Li and Flibe blankets for FFHR by neutronics analysis with focus on the effect of Be and  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating on TBR, shielding and activation.
- B) To examine or improve the neutronics calculation procedure for application to liquid blankets by comparison with activation experiments using D-T neutrons.

In the neutronics assessment of FFHR, 3 dimension Monte Carlo code MCNP-4C with JENDL3.2 pointwise nuclear data file and FISPACT-2001 code with EAF-2001 file in 175 energy groups were used for neutron transport and activation calculations, respectively. The results obtained are qualitatively assumed as follows: Use of Be can significantly improve TBR for both Li/V-alloy and Flibe/V-alloy blankets. For the Li/V-alloy blanket with Be, the shielding property can be greatly improved maintaining the adequate TBR. On the other hand, the shielding property of the Flibe/V-alloy blankets with and without external Be is comparable. The quantitative estimate of the effects of  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating showed that the activation of the coating could influence the long-term activation property of the structural components. However, recycle of materials for the structural components is still feasible with  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating in 10  $\mu\text{m}$  thickness. With 1  $\mu\text{m}$  thickness of the coating, the activation level of the blanket is close to the hands-on recycling limit.

For the purpose of verifying or improving the neutronics calculation procedure, especially activation analysis of liquid blankets, a series of irradiation experiments were performed using Fusion Neutronics Source (FNS) at Japan Atomic Energy Agency (JAEA), which is well-suited to neutronics study relevant to a D-T fueled reactor. The specimens of V-4Cr-4Ti, Er and Teflon in 10 mm×10 mm×0.03-0.1 mm were prepared for studying the activation of V-alloy structure, MHD coating of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and F in molten salt Flibe, respectively. In addition to the assembly for direct D-T neutron irradiation, Be, Li and Li/Be mock-ups were assembled to examine the dependence of the activation on neutron spectrum expected in fusion blankets.

The activities of specimens measured with a high purity Ge detector were compared with the calculations using FISPACT-2001 codes and EAF-2001 file. The neutron flux calculated by MCNP-4C was used as input file in FISPACT-2001 calculation. In this study, the continuous-energy cross-section data were also used in activation calculation in the limited cases in addition to the data of EAF-2001 in 175 and 315 energy groups.

Comparison of calculation (175 groups) to experiment (C/E) shows that the values of C/E for most of radioactive nuclides (<sup>18</sup>F, <sup>48</sup>Sc, <sup>161</sup>Er, etc) produced by reactions with high-energy threshold lie in the range of 0.8-1.2. A significant underestimation for <sup>168</sup>Ho (C/E 0.62) was found in D-T neutron irradiation case. It could be caused by the effects of coarse energy grouping near 14 MeV because <sup>168</sup>Er(n,p) <sup>168</sup>Ho has a threshold energy close to 14 MeV and its cross-section rises steeply around 14 MeV. In fact, the C/E value of <sup>168</sup>Ho calculated with continuous-energy cross-section approached unity.

The comparisons of activation for <sup>171</sup>Er and <sup>52</sup>V, both of which are the products of (n, γ) reactions, were performed with activation data in 175, 315 energy groups and continuous data. For <sup>52</sup>V, the major contribution is the reaction with thermal neutrons. Using 315 group cross sections, C/E values of <sup>52</sup>V show a clear trend approaching to unity relative to those using 175 energy groups case because of the finer group structures in thermal neutrons range. The results also agree well with the results using the continuous-energy cross section. The reaction <sup>170</sup>Er(n, γ) <sup>171</sup>Er has a huge resonance peak at 95 keV. Large overestimations for <sup>171</sup>Er were observed with group data due to the coarse grouping in the resonance region. Use of continuous-energy cross-section provided much better agreement with experiment for Be mock-up, where the neutron flux is almost constant with energy in the resonance range. On the other hand, for the case of Be/Li mock-up, where the flux rapidly increases with energy in the resonance range, large discrepancy (C/E ~ 1.17) was observed even with continuous cross-section. This result clearly indicates the necessity for re-evaluation of the cross-section data of <sup>170</sup>Er(n, γ) <sup>171</sup>Er reaction. This issue was disclosed through the comparative examination of C/E in various neutron spectra, and thus unique achievement of this study.

Conclusions of the present study are:

A) Detailed neutronics characterization of Li and Flibe blankets using V-alloy structure for FFHR has, for the first time, been carried out:

A-1) Advantage of the use of Be is quantified. With Be, TBR design margin for Li and Flibe blankets could be improved. For Li blanket with Be, the shielding design margin could also be improved with adequate TBR. The results provide information necessary for characterizing trade-off of using Be in Li and Flibe blankets.

A-2) The  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating induces the long-term radioactivity of Li blanket. However, recycle of structural materials is still feasible with  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating in 10  $\mu\text{m}$  thickness. Thinner  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating is necessary for realizing hands-on recycling.

B) Experimental studies of activation characteristics for materials in Li and Flibe blankets have been carried out using a D-T neutron source, especially for the first time for the  $\text{Er}_2\text{O}_3$  coating:

B-1) For the threshold reactions, where the threshold energy is close 14 MeV and its cross-section rises steeply around 14 MeV, continuous-energy cross-section data is needed.

B-2) For the  $(n, \gamma)$  reaction with high cross-section at thermal neutrons region, finer grouping is necessary.

B-3) Use of continuous-energy cross-section is necessary for  $(n, \gamma)$  reaction with dominant resonance peak in medium energy ranges.

B-4) The cross section data of  $^{170}\text{Er}(n, \gamma)^{171}\text{Er}$  needs re-evaluation.

## 論文の審査結果の要旨

核融合炉を実現するには、炉心で発生する高エネルギー中性子からの熱を取り出し、燃料トリチウムの増殖、放射線の遮蔽、の主要3機能を同時に可能とする「ブランケット」の研究開発が必須の課題であり、世界各国で進められている。ブランケットには様々なタイプのものが考案されているが、熱やトリチウムの取出しが容易で連続的な成分調整が可能な液体増殖材を用いた液体ブランケットが長期的には優れた性能が見込めると考えられている。液体ブランケットとしては、低放射化構造材料と液体増殖材の組み合わせの異なるいくつかの概念が検討されている。しかしながら、これらの概念に対して中性子輸送過程計算に基づく機能特性とその精度解析は、系統的には充分行われていない。特に中性子増倍材 Be を使用するか、遮蔽領域をどれだけ確保するか、など設計の大きな選択肢の検討に当たっては、詳細な解析が必要である。また先進概念のブランケットでは、液体リチウム耐食性に優れた MHD 電磁流体効果抑制絶縁被覆材として選定された酸化エルビウムなど、これまで検討実績のほとんどない機能性材料を使う場合が多く、それらの中性子工学の点からの評価も必要である。

Zaixin Li 氏は、先進核融合炉液体ブランケットとして期待されるバナジウム合金と液体リチウムあるいは熔融塩 Flibe を用いたシステムの核特性に関するモデル計算及び放射化試験を行った。LHD 型ヘリカル型核融合炉設計 FFHR を取り上げ、最新の核データとモンテカルロ計算コードを駆使し、トリチウム増殖比、遮蔽性能、放射化への中性子増倍材 Be や酸化エルビウム絶縁被覆の効果、熔融塩 Flibe の放射化特性などを明らかにした。特に中性子増倍材 Be を導入することによるトリチウム増殖能と遮蔽性能への影響を定量的に示した成果は、Be 導入の得失に関する系統的な機構理解を可能にし、液体ブランケットの設計に学術的な指針を与えた。また、液体リチウムブランケットの MHD 圧力損失低減のために必要とされる酸化エルビウム被覆厚さと、ブランケットの長寿命の誘導放射能との相関を明らかにするとともに、酸化エルビウムの放射化計算精度とエネルギー群分割との相関を見出した。

Zaixin Li 氏は、放射化計算においてエネルギー分割の影響を見出した問題点をさらに追及し、計算手法の高度化指針を得る目的で、日本原子力研究開発機構の D-T 中性子源 FNS を用いた放射化ベンチマーク試験を実施した。特に、Be および Li のブロックを用いて、液体ブランケットに相当するエネルギー範囲で中性子スペクトルを変化させた照射場を実現し、放射化実験を行なったのは、これまでにない新しい試みである。放射化特性に関する実験と計算との比較により、反応の種類別にエネルギー群分割の問題点を明らかにするとともに、精度向上のための群分割の選択の指針を具体的に示した。また、エルビウムの核反応については、共鳴領域で変化するスペクトルの場合は最新の連続核データを用いても計算と実験に大きな差が残ることをはじめて示し、データベースの問題点を指摘するとともに、再評価の必要性を明確に示した。これはスペクトルを変化させた実験結果を相互比較することで初めて明らかになったことであり、学術的に重要かつ新規性の高い成果である。

以上本研究は、高性能の核融合炉ブランケットとして期待されるバナジウム合金と液体リチウム及び熔融塩 Flibe を用いるシステムに関して、中性子輸送計算によりその特性と

計算課題を明らかにし、これに基づき、新規に改良した実験との比較により、計算手法の高度化指針を導出し、さらに既存核データの問題点を見出したものである。これらの成果は核融合炉ブランケットの設計に大きく寄与するとともに、核データを含めた中性子工学分野で学術的に意義あるものと認められる。以上により、本論文は学位論文として十分価値があると判断した。