

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：17102

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19055007

研究課題名（和文） 核融合炉ブランケットにおけるトリチウム挙動解明

研究課題名（英文） Clarification of tritium behavior in fusion reactor blankets

研究代表者

深田 智 (FUKADA SATOSHI)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授

研究者番号：50117230

研究成果の概要（和文）：

核融合炉固体と液体ブランケットで、定常運転維持に必要な実質 $TBR > 1$ 構築と核融合炉全体のトリチウム漏洩許容率達成のため、B1 班では化学工学的立場から、ブランケット中トリチウム掃出、パージガスからの回収実証、流動現象の精密予測をおこない、B2 班では材料科学的立場から、ブランケット組成変更に伴う TBR の改善、構造材料の腐食防止策検討、トリチウム透過阻止率を $1/1000$ 以下にする。本 B3 班では上記研究効率化のため、定期的検討会開催とともに、研究遂行支援をおこなった。

研究成果の概要（英文）：

It is necessary to construct blanket systems higher than $TBR > 1$ for solid or liquid breeder materials that is necessary for steady-state operation and to decrease the tritium leak rate lower than the allowable level. The B1 group performed experimental researches of effective tritium evolution and recovery of Li, Li-Pb, Li_2TiO_3 , etc from a chemical-engineering scope, and the B2 group did experimental clarification of new breeding materials, material-breeder interaction and development of a new effective tritium permeation barrier of $PRF < 1/1000$ from a material-science scope. In order to perform the researches effectively, the B3 group held meeting between B1 and B2 members regularly to exchange information and funded the group members to assist their researches.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	1,200,000	0	1,200,000
2009年度	1,200,000	0	1,200,000
2010年度	1,200,000	0	1,200,000
2011年度	2,500,000	0	2,500,000
総計	7,300,000	0	7,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合炉、ブランケット、トリチウム、増殖率、透過漏洩

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の定常状態運転維持と安全性確保のため、特にB班ではトリチウム製造と回収、

熱回収と放射線防護の役目をなすブランケットのトリチウム研究を遂行するため組織された。そのうちB1班では定常核融合炉達成のた

め、総合的なトリチウム増殖比 $TBR > 1$ を達成するため、特に化学工学的研究の立場から必要なトリチウム回収率達成のための各種ブランケットからのトリチウム掃出と新規回収装置開発を第一に考え、次いで B2 班は、核融合炉安全性確保のため、新規増殖材の開発、材料科学的研究手法を使い、透過低減率 $PRF < 1/10^3$ を達成する酸化膜を新たに開発するとともに、Li や Li-Pb 液体ブランケット材と構造材料の腐食防護のため、増殖材中の不純物除去の実験的検証をおこなうように組織された。本 B3 班はその B1 班と B2 班の研究が速やかに行えるように組織された。

2. 研究の目的

背景で述べたように、核融合炉ブランケットは各目的に応じた立場からの最先端の研究をするとともに総合的な立場からの統一したシステムとして調和させての研究が必要である。B1 班と B2 班は異なった立場から核融合炉ブランケット研究を遂行する。これを円滑におこなうため、本特定領域 B3 班は、総合的な立場から、各班の情報交換を速やかにおこなうとともに、班を構成するメンバーの研究が速やかに進行するために各班の班長で構成される。さらに研究の総括をおこなうため総括班とも綿密に打ち合わせをおこない、効果的実験解析研究を遂行する。

3. 研究の方法

図 1 に示すように、核融合炉ブランケット研究に必要なトリチウム製造と安全性の保持には、ナノスケールのトリチウム移行挙動の把握から、メータースケールの回収装置設計に至るまで極めて広いスケールの研究が必要で、濃度範囲も 10^{10} 倍に及ぶかなり広く領域を考える必要がある。

本研究班の構成員を B1 班と B2 班の班長とし、各班の研究で生まれた新しい情報を速やかに交換するため、常に密接な連絡を保ち、さらに各班の研究分担者の定期的な会合を少なくとも年 1 回以上とし、最新の研究成果を交換する。B1 班と B2 班は異なった研究スタンスから目的思想的に共通の目標達成をおこなうことが求められているので、それに見合った研究計画の実施をおこなう。

4. 研究成果

B3 班は調整班であり、本班自体では研究活動をおこなわず、以下の B1 班と B2 班の研究遂行の調整、合同検討会をおこなった。
 2007 年 11 月 8 日 JAEA 東海 B 班検討会
 2008 年 2 月 4 日 東京 B 班検討会
 2008 年 6 月 16 日 JAEA 東海 B1 班検討会
 2008 年 12 月 1 日 東京 B 班検討会
 2009 年 7 月 31 日 東京 B 班合同検討会
 2010 年 5 月 11 日 名古屋 B 班検討会

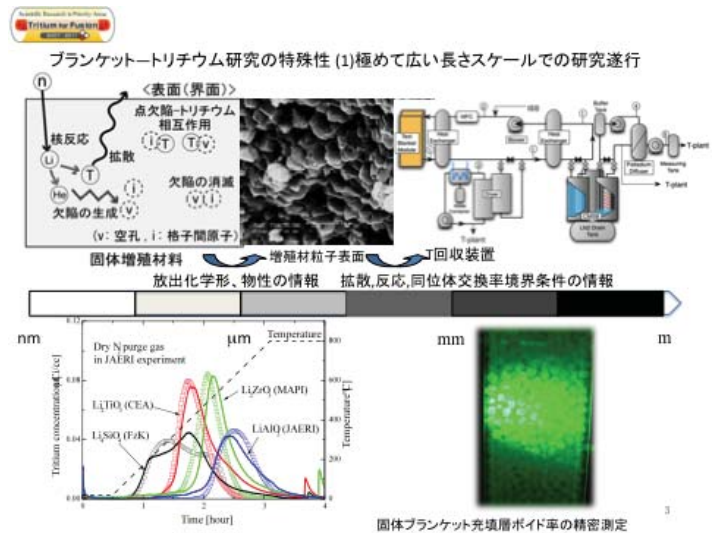


図 1 広いスケールでのブランケット研究必要性

2011 年 2 月 4 日 東京 B 班検討会

2012 年 3 月 3 日 東京 B 班検討会

これ以外に総括班関連の研究会が毎年開かれ、B1 班と B2 班から班員が研究グループごとに参加し成果発表している。

将来の定常状態核融合炉で 1GW の熱出力あたり 150g/day (=1.4MCi/day) のトリチウムを燃焼させる必要がある。定常燃焼するにはブランケット内で同量以上のトリチウムを生産する必要があり、また核融合炉全体で目標のトリチウム漏洩率を 10Ci/day 以下にすることを一つの目標にしている。単純に考えて、トリチウムの直接接触する箇所から外部環境までトリチウムの流れを $1/10^5$ にする必要があるので、そのため、連続的にブランケットから

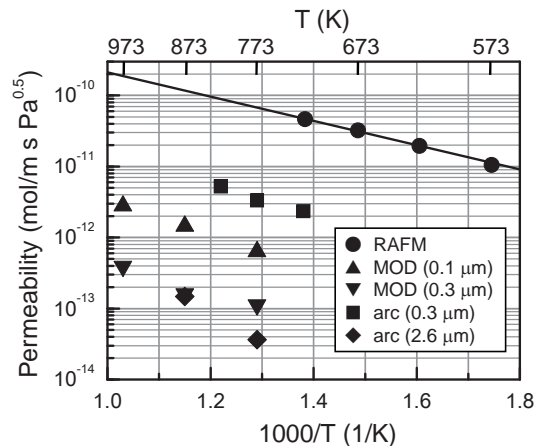


図 2 トリチウム透過阻止率の温度依存性 (B2 班東大近田、寺井)

のトリチウム回収率目標値を 99.9% とし、さらに透過低減率 (PRF) を $1/10^3$ にすることを研

究ターゲットとする。

PRFについては過去 Al_2O_3 被覆や Au 被覆等の実験がおこなわれて来たが、 $1/10^3$ を達成するのが限界で、また長期の性能維持と熱応力による割れ等の問題があった。東大グループは、 Er_2O_3 被覆をアーク放電蒸着法と金属有機化合物分解法(MOD)を試験し、現在のところの世界最大の PRF を得ている。図2に見るように温度依存性が有るが、 $1/10^5$ 程度の PRF が達成されている。

固体増殖材 Li_2TiO_3 は日本のブランケット開発研究の代表的なものであり、B1 班でも図3の結果に見るようにトリチウム放出挙動の定量評価と水分生成がトリチウム放出に与える影響が定量的に求められた。さらに JAEA グループは、増殖材ペレット充填層内流れの効果を求め、さらに電気分解法や低温吸着法による回収の実験をおこなってきた。さらに B2 班では Li_2O と Li_2TiO_3 を混合合成することによりトリチウム増殖性能と水放出等の不安定性が改善された。このように B1 班と B2 班で、協調して成果を挙げる事が出来たことが大きな成果である。

液体ブランケット材においても Li については、B1 班で Y による T 回収法の実験的検討が、B2 班で Li 中の N による鋼材表面腐食の影響解明と N 除去のための TiFe トラップ研究が実行された。材料科学的な研究成果を基に、実際のトリチウム回収装置の設計がおこなわれた。その意味で、Li ブランケット材については、トリチウム除去用 Y トラップと N 除去用 TiFe トラップの設計にまで至った。また図4に示すように、Flibe 増殖材から 99.9%以上のトリチウムを連続回収するための He-Flibe 向流抽出塔の設計研究がなされ、図に挙げたスケールの装置でトリチウムを回収する計画が検討された。

当初研究計画にも挙げた B 班の目標である「核融合炉固体・液体ブランケットのトリチウム(T)移行の道筋定量化はできたか」については次のようにまとめることができる。

・固体ブランケット内部可視化に世界で初めて成功し、ミクروسケール内部流動とマクロ圧力損失、T 移動が一つにつながった(B1 榎枝)

・固体増殖材への水分影響が定量化でき、固体内部からの T 放出の定量化に成功した(B1 片山西川)

・ブランケットパージガスからの新規トリチウム回収装置としてセラミック型除去装置を開発し、実用への適用可能性を示した。(B1 河村)

・Li 中のトリチウム濃度測定に成功した(B1, B2), Y 回収装置による回収実証(B1 深田)

・Flibe からの T 放出予測に成功した(B1)

・LiPb の中性子照射(B2)、自然対流(B1, B2)、溶解・拡散同位体効果(B1 深田)によりトリチ

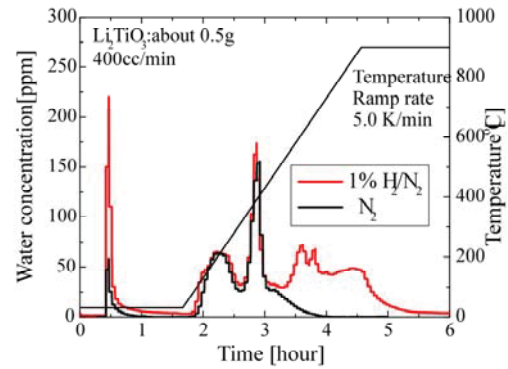


図3 固体増殖材 Li_2TiO_3 からの水分発生 (B1 班片山、西川)

ウム移行と物性が定量化された

・D-T 中性子を日本のブランケット第一候補材 Li_2TiO_3 に照射し、T 移行挙動が初めて求められた(公募落合)

・増殖粒子の TBR 改善のため、 Li_2O 添加ブランケット材の改良がなされた。世界でも最先端研究として認知されている(B2 星野)

・酸化エルビウム膜による透過防止膜で世界最高性能の透過阻止率 $1/10^5$ 以下を達成し、将来の大規模装置への適用が可能な様に湿式法を新たに開発した (B2 近田、寺井)

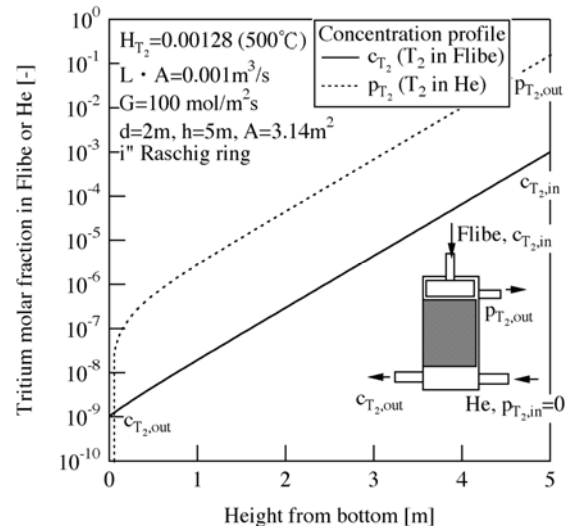


図4 気液向流抽出塔内 T 濃度変化設計 (B1 班深田、相良)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計22件)

① T. Chikada, A. Suzuki, T. Terai,
“Deuterium permeation and thermal

behaviors of amorphous silicon carbide coatings on steels”, Fusion Engineering and Design, 86 (2012) 2192-2195 (査読有り).

②Y. Edao, H. Noguchi, S. Fukada,

“Experiment of hydrogen isotopes permeating through Li-Pb with diffusion, dissolution and isotopic exchange”, Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 723-726 (査読有り).

③S. Fukada, Y. Edao, “Unresolved issues on tritium mass transfer in Li-Pb liquid blankets”, Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 727-730 (査読有り).

④T. Chikada, A. Suzuki, T. Kobayashi, H. Maier, T. Terai, T. Muroga,

“Microstructure change and deuterium permeation behavior of erbium oxide coating”, Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 1241-1244 (査読有り).

⑤T. Chikada, A. Suzuki, H. Maier, T. Terai, T. Muroga, “Modeling of tritium permeation through erbium oxide coatings”, Fusion Science and Technology, 60 (2011) 389-393 (査読有り).

⑥T. Norimatsu, H. Saika, H. Homma, M. Nakai, S. Fukada, “Leakage control of tritium through heat cycles of conceptual-design, laser-fusion reactor Koyo-F”, Fusion Science and Technology, 60 (2011) 893-896 (査読有り).

⑦J. Yagi, A. Suzuki, T. Terai, “Tritium monitoring for liquid lithium by permeation through iron window”, Fusion Science and Technology, 60 (2011) 1014-1017 (査読有り).

⑧T. Chikada, A. Suzuki, C. Adelhelm, T. Terai, T. Muroga, “Surface behavior in deuterium permeation through erbium oxide coatings”, Nuclear Fusion, 51 (2011) 063023 (査読有り). ⑨M. Nagura, A. Suzuki, K. Sasaki, T. Terai, “Chemical stability of LiYO₂ as an insulating material”, Fusion Engineering and Design, 85 (2010) 1098-1101 (査読有り).

⑩T. Chikada, A. Suzuki, T. Tanaka, T. Terai, T. Muroga, “Microstructure control and deuterium permeability of erbium oxide coating on ferritic/martensitic steels by metal-organic decomposition method”, Fusion Engineering and Design, 85 (2010) 1537-1541 (査読有り).

⑪深田智、榎枝幹男、河村繕範、片山一成、西川正史、相良明男, “プロジェクトレビ

ュー核融合炉実現を目指したトリチウム研究の新展開, 4. 核融合炉ブランケット材中のトリチウム移動現象解明と新規回収プロセス開発の研究, プラズマ核融合学会誌, 85 (2009) 704-707 (査読有り).

⑫奥野健二、深田智, “小特集「トリチウムの挙動を知る1. はじめに」”, プラズマ・核融合学会誌, 85 (2009) 2 (査読有り).

⑬深田智、波多野雄治、原正憲, “小特集「トリチウムの挙動を知る6. トリチウムの移行過程を知る」”, プラズマ・核融合学会誌, 85 (2009) 31-35 (査読有り).

⑭深田智、小田卓司, “連載講座 今、核融合炉壁が熱い! -数値モデリングでチャレンジ-, 第9回 VIII. 壁が作る燃料をどうするのか”, 日本原子力学会誌 51 (2009) 178-182 (査読有り).

⑮前田泰、枝尾祐希、深田智, “液体リチウムからの水素同位体の回収に関する研究”, 九州大学大学院総合理工学報告, 29 (2008) 322-326 (査読有り).

⑯S. Fukada, K. Katayama, T. Terai, A. Sagara, “Recovery of tritium from Flibe blanket in fusion reactor”, Fusion Science and Technology, 52 (2007) 677-681 (査読有り).

⑰深田智, “レーザー核融合炉トリチウム増殖燃料サイクル系について”, 核融合工学部会部会報, 14 (2007) 44-47 (査読無し).

⑱以降、論文報告多数のため省略。他の成果はホームページに掲載されている。

[学会発表] (計42件)

①W. Mao, T. Chikada, A. Suzuki, T. Terai, “Ab-initio study of hydrogen diffusion in erbium oxide”, 日本原子力学会 2012 年春の年会, March 19-21 (2012), Fukui, Japan.

②近田拓未、鈴木晶大、Freimut Koch、Hans Maier、寺井隆幸、室賀健夫, “多層膜における水素同位体透過と液体リチウム鉛中化学挙動”, 日本原子力学会 2012 年春の年会, 3月19-21日 (2012)、福井大学.

③T. Chikada, J. Yagi, A. Suzuki, T. Terai, “Tritium-material interactions in fusion blankets”, Asian CORE International Symposium on Advanced Energy Systems and Materials, Jan. 16-17, (2012) Beijing, China.

④近田拓未、鈴木晶大、Hans Maier、寺井隆幸、室賀健夫, “金属-セラミック多層構造を用いたトリチウム透過防止膜の高性能化”, 第28回プラズマ・核融合学会年会, 11月22-25日 (2011) 石川市.

⑤寺井隆幸、鈴木晶大、八木重郎、名倉勝、小宮山大輔、倉田拓音, “II. ブランケット

トからのトリチウム回収;(7)小型Li-Pb 熱対流ループの照射下トリチウム回収試験”, 日本原子力学会 2011 年秋の大会, 9月19-22日(2011)、北九州市。

⑥近田拓未、鈴木晶大、寺井隆幸、室賀健夫, “III. 構造材料中からのトリチウムの透過とその抑制; (2) 酸化エルビウム薄膜からのトリチウム透過挙動のモデル化”, 日本原子力学会 2011 年秋の大会, 9月19-22日(2011)北九州市。

⑦八木重郎、鈴木晶大、寺井隆幸, “II. ブランケットからのトリチウム回収; (6) 複合金属透過窓によるリチウム中水素同位体の回収と定量”, 日本原子力学会 2011 年秋の大会, 9月19-22日(2011)、北九州市。

⑧Y. Edao, H. Okitsu, M. Okada, S. Fukada, “Isotope effects on tritium mass transfer in $Li_{17}Pb_{83}$ liquid blankets”, Proc. of 3rd China-Japan workshop on the tritium and breeding blanket technology, Kunming, China, June 20-23, 2010.

⑨S. Fukada, Y. Edao, “Unresolved issues on tritium mass transfer in Li-Pb liquid blankets”, 14th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-14), Sapporo, (2009) September 7-11.

⑩S. Fukada, K. Katayama, Y. Edao, K. Sato, K. Kobayashi, T. Hayashi, T. Yamanishi, “Tritium migration through concrete enclosures of tritium handling facilities”, Proc. 9th International Atomic Energy Agency Technical Meeting on “Fusion Power Plant Safety”, 15-17 July 2009, Vienna, Austria.

⑪M. Enoda, H. Tanigawa, D. Tsuru, T. Hirose, K. Ezato, K. Yokoyama, M. Dairaku, Y. Seki, S. Suzuki, K. Mohri, H. Nishi, H. Tanigawa, K. Ochiai, S. Sato, Y. Kawamura, M. Akiba, S. Fukada,

“Research and development on water-cooled solid breeder test blanket module in JAEA”, 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), Aomori, Japan, Oct. 13-18, 2008, Paper ID P16P1272.

⑫T. Hanada, M. Nishikawa, S. Fukada, K. Suematsu, N. Yamashita, “The effect of surface water on tritium release behavior from Li_4SiO_4 ”, Proc. the 10th Cross Straits Symposium on Materials, Energy and Environmental Engineering, Kyushu Univ. EYP-33 (2008) 218-219.

⑬Y. Edao, S. Yamaguchi, H. Noguchi, S. Fukada, “Behavior of hydrogen isotopes in liquid Li-Pb blanket of fusion reactor”, Proc. the 10th Cross Straits

Symposium on Materials, Energy and Environmental Engineering, Kyushu Univ. EYP-30 (2008) 212-213.

⑭S. Fukada, Y. Edao, S. Yamaguchi, N. Hayashi, A. Sagara, “Hydrogen diffusion and hydrogen isotopic exchange on molten salts of mixed fluorides, Flibe ($LiF+BeF_2$) or Flinak ($LiF+KF+NaF$), Proc. Joint Symposium on Molten Salts, 875-880. Oct. 19-23, 2008, Kobe, Japan.

⑮S. Fukada, Y. Edao, S. Yamaguchi, “Tritium recovery from Li-Pb eutectic alloy blanket”, Proc. of 2nd Japan-China workshop on blanket and tritium technology, May 9-10, 2008, 117-120.

⑯Y. Edao, Y. Maeda, S. Fukada, “Permeation of hydrogen isotope and tritium recovery system in liquid Li-Pb blanket”, the 9th Cross Straits Symposium on Materials, Energy and Environmental Engineering, Pohan, Korea, Nov. 21-22, (2007) 311-312.

⑰S. Fukada, Y. Edao, Y. Maeda, T. Norimatsu, “Tritium recovery system for Li-Pb of Inertial Fusion Reactor”, The 4th IAEA-Technical Meeting on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers, Sep. 13, 2007.

⑱以降、学会報告多数のため省略。他の成果はホームページに掲載されている。

[その他]

ホームページ

<http://tritium.nifs.ac.jp/>

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K001210/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深田 智 (FUKADA SATOSHI)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授
研究者番号：50117230

(2) 研究分担者

寺井 隆幸 (TERAI TAKAYUKI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：90175472

(3) 連携研究者

()

研究者番号：