

5 核融合中性子による ^{129}I の消滅処理

嶋田・飯尾研究室 95M21312 山口寛樹

1 緒論

核融合炉の最大の特徴は、実質的には無尽蔵であり、クリーンなエネルギー源であることである。しかしながら、核融合炉の発電炉としての商業化は、世代を越えた長期的展望と、ばく大な研究開発費が、現在のところ必須である。そのため、夢のエネルギー源であることは、認識されながらも、研究開発をとりまく社会の受容は、決して楽観できるものではない。しかし、核融合炉を、放射性廃棄物の消滅処理、材料開発等を目的とした中性子源としてとらえるならば、核融合反応のエネルギー増幅率が1以下でもその役割は果たすことが可能であり、実用炉として成り立つことが考えられる。

そこで、本研究では小型トカマク型DT核融合炉について、放射性廃棄物の消滅処理の可能性について検討した。消滅対象としては、入手の条件、消滅可能性などを考慮し、最も実現性が高いと考えられる、 ^{129}I に注目した。本研究では高効率な ^{129}I の消滅効率を実現しつつ、トリチウムの自己供給が可能な核融合炉の設計を目指している。また、超伝導コイルの発熱による電流クエンチの防止が可能な遮蔽体についても考慮し、よりトータルな消滅炉としての概念設計を目指している。そして、DD核融合炉による ^{129}I の消滅の可能性についても検討した。

2 中性子核転換法

原子力発電所において使用した核燃料は再処理工場において溶解され、核燃料として再利用できる U 及び Pu が回収される。その際高レベルの放射性廃液が発生し、その処分が現在大きな話題となっている。

現在、High Level Wastes(HLW)の処分方法として天然及び人工バリヤによる放射性廃棄物の隔離を目的とした、地層処分などの廃棄処分がもっとも有力視されている。しかし、超長期にわたって毒性を有する核種を、それに見合った期間、人間環境から隔離して保管することはきわめて困難である。これらの解決策として、中性子核転換法が提案されている。中性子核転換法とは、長寿命の放射性核種を中性子の照射により、短寿命の放射性核種、または安定な核種に転換し、長

寿命の放射性核種の毒性を著しく軽減する方法である。

2.1 消滅対象

本研究では、消滅処理の対象として核分裂生成物である ^{129}I を取り上げる。 ^{129}I は、ヨウ素が揮発性であり環境中に漏れやすく、甲状腺を中心として体内に蓄積されるため危険である。しかも ^{129}I の半減期は1570万年であり非常に長い。また、揮発性のためヨウ素は再処理工程のオフガスから容易に分離される。ただし、安定核の ^{127}I が約1/5の割合で混じっている。

原子炉より排出される HLW に含まれる核分裂生成物においてその毒性が問題とされる核種は、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{129}I 、 ^{99}Tc である。

人工的に消滅処理を行うからには、放射性核種の実効半減期が長くとも3年以下とすることが要求される。しかし、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs の中性子捕獲による核転換により実効半減期を3年以下にするには、核種に照射されるそれぞれ $7.5 \times 10^{15} \text{n/cm}^2$ 、 $7.5 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$ 以上の中性子束を必要とし、トカマク型 DT 核融合炉での許容中性子壁負荷 $10^{14} \text{n/cm}^2 \text{s}$ を大きく越えてしまう。

^{129}I 、 ^{99}Tc はそれぞれ、比較的大きな熱中性子捕獲断面積、共鳴捕獲断面積をもち、トカマク型 DT 核融合炉における (n,) 反応を利用した消滅処理が有効であると推測される。実際、 $7.0 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{s}$ の中性子束を照射することにより、人工的に実効半減期を3年以下とすることが可能となる。この中性子束の値は、Be、Pb等の中性子増倍材を用いて増倍することによりトカマク型 DT 核融合炉において十分期待できる。しかし、テクネチウムは、高速中性子による (n,2n) 反応(中性子断面積は1~2bである)により、 ^{99}Tc より20倍長い半減期を持つ ^{98}Tc に核転換される。更に、 ^{129}I は ^{99}Tc より大きな毒性を持つ。以上の検討より ^{129}I を本研究の消滅対象とする。

3 中性子源

中性子核転換法に用いられる中性子源として、核融合炉、高速増殖炉、加速器等が挙げられる。高エネルギースペクトルの中性子束が得られるという点では加速器が最も優れており、中性子核転換法においては最

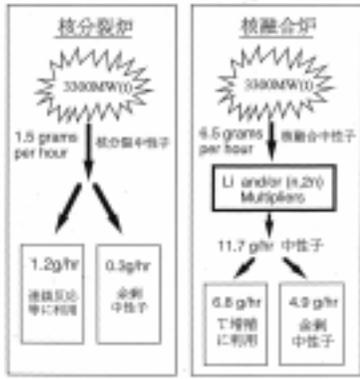


図 1: Neutron economy of fission and fusion.

も優れた特性を示し完全消滅の可能性があるとされる。しかしエネルギー収支が悪くエネルギーバランスを満足しない。同熱出力の核分裂炉と核融合炉より得られる中性子束の大きさについて、定量的に比較する。図 1 より、核融合炉は核分裂炉に比べ余剰中性子をおよそ 1 桁多く得ることができ、中性子核転換法による消滅処理に用いる中性子源として優れた特性を持つことが分かる。

4 ブランケットの核設計

DT 核融合炉の燃料の 1 つであるトリチウム (T) は天然に存在しないため、核融合炉内で生産されなければならない。そこでブランケット材料としてトリチウム生成を目的としてリチウムまたはリチウム化合物、 Li_2O 、 LiAlO_2 等が用いられる。天然リチウムには同位元素として ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ がそれぞれ、7.4%、92.6% 含まれ、 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 、 ${}^7\text{Li}(n,n'\alpha)\text{T}$ 反応によりトリチウムを生成する。 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ はそれぞれ熱中性子領域、高速中性子領域において大きな中性子捕獲断面積を示す。これまでに検討されたブランケットにおいては、大部分のトリチウムは ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 反応により生成される。実用炉クラスの場合には、トリチウムの自己供給を可能とする事が要求され、Tritium Breeding Ratio (TBR) が、1 以上である必要がある。

装置遮蔽の典型的な対象である超伝導マグネットは、中性子ガンマ線の照射により、所定の核発熱を越えると超伝導状態が破綻し電流クウェンチを引き起こす。このような点から、核融合炉における装置の遮蔽は、炉心設計の一部として位置づけられる。

4.1 中性子輸送コード ANISN

核融合炉ブランケット中での中性子の挙動は中性子輸送方程式で記述される。本研究では、1次元多群法

コードである「ANISN」を用い、輸送方程式を解き、ブランケット内の中性子束分布を得ている。また、核データとしては、核融合核計算群定数セット FUSION-40、及び、FUSION-40 用核発熱定数 KERMA を用いた。

4.2 ローカル TBR の目標値

核融合炉の炉心部の構造を考慮したネット TBR は、ローカル TBR にブランケットの設置可能領域を考慮した実効面積比という因子を掛けることにより与えられる。実効面積比の評価には、ダイバータ設置領域や加熱用及び排気用ポートは勿論、ブランケット容器の厚さ等トリチウムの増殖に直接的、間接的にも関与しない全ての部分を考慮する事が要求される。ITER では実効面積比が ~ 0.6 と評価している。

本研究で対象とする核融合炉は諸装置が小型であることから、インボードブランケットの設置可能領域がより小さくなること等の理由により、実効面積比については ITER より厳しい値が設定されることが予想される。そこで本研究で対象とする核融合炉の実効面積比を、とりあえず ITER と同様の 0.6 と設定する。さらに、ITER と同様に外部からのトリチウム供給が得られるものとし、本研究のローカル TBR の目標値を 1.70 とする。

5 機能材料の評価

本章においては、トリチウム増殖材、中性子増倍材、反射材、遮蔽材といったブランケットに用いられる材料について、それらの特性を評価し、それぞれの材料について ANISN コード用いてブランケット材料としての特性を評価し、本研究における核設計の方針を検討する。

5.1 トリチウム増殖材

本研究ではトリチウム増殖材として、比較的大きな TBR が得られるとされる Li_2O を採用する。以下にその特徴を、他のトリチウム増殖材との比較により示す。

トリチウム増殖材の候補材料としては、 Li_2O に代表されるセラミックス固体増殖材と、液体リチウム、リチウム鉛合金、熔融塩などの液体増殖材とに大別される。固体増殖材は、化学的安定性が液体増殖材に比べて著しく大きく、使用温度が液体増殖材に比べ高温である等の特徴をもつ。液体増殖材はそれ自体が冷却材料として利用可能であること、増殖材料の連続処理が可能であること、液体であるため照射損傷がないことが長所としてあげられるが、強磁場下における MHD 圧損が大きな問題となっている。

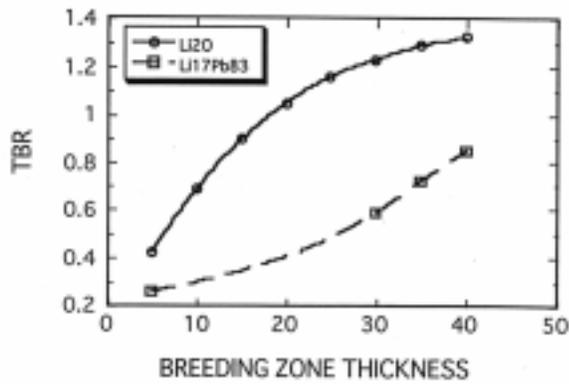


図 2: TBR of Li_2O and $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$

本節では、個体増殖材料として Li_2O 、液体増殖材料として $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ を採用し検討した。それらについて行った TBR の計算結果を図 2 に示す。装荷領域が同等である場合、明らかに Li_2O をトリチウム増殖材として用いたほうが大きな TBR を得ることができる。 $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ の Li 密度が低いこと、中性子への Li による減速効果の影響から Pb によるしきい値反応である $(n,2n)$ 反応の発生数が低くなっていることが原因として考えられる。

5.2 中性子増倍材

核融合炉に用いられる中性子増倍材に要求される諸特性、中性子増倍反応に関する核的特性からみると、中性子増倍材としては Be と Pb が実用可能性の高い核種といえる。Pb は反応断面積は大きい、しきい値が 7~9 MeV と高い。一方、Be は中性子増倍反応断面積は Pb の 1/4 以下であるが、原子密度が Pb の 4 倍程度と大きいこと、中性子増倍反応のしきい値が低く、二次中性子が再度増倍反応を起こすことから中性子増倍材として優れている。

Be と Pb の中性子増倍効果、及びその TBR への影響について計算し評価した。図 3 に計算結果を示す。Pb にくらべ Be がより高い中性子増倍効果を示すことがわかる。Be を 16cm としたとき中性子増倍率が最大値を示すことは、Be の $(n,2n)$ 反応断面積が $\sim 0.6\text{b}$ 、密度が 0.124×10^{24} (個/cm³) であることから平均自由行程は ~ 14 cm となることから、説明できる。Pb については減速効果が小さいため、増倍層を厚くしてもさほど増倍率の減少はみられない。図 4 に Be、Pb の厚さをそれぞれ 16 cm、20 cm とした際の、中性子増倍層から漏出する中性子束のスペクトル分布を示す。増倍材に Be を用いると、Pb を用いた場合と比べ、10 eV 以下において大きな中性子束が得られ

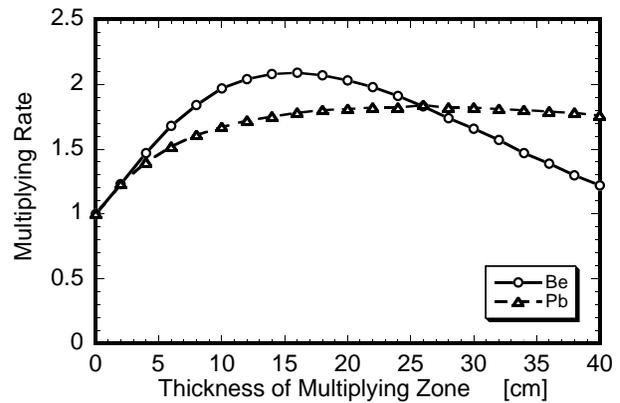


図 3: Multiplying rate of neutrons for Be and Pb

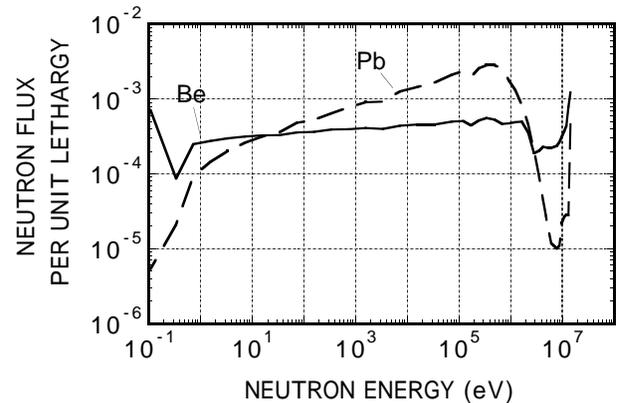


図 4: Neutron spectrum for Be and Pb

ている。 ^{129}I の消滅処理には大きな熱中性子束を得ることが必要であることから、中性子増倍材として Be が有効であることがわかる。

6 ブランケット構成

本章では、超伝導コイルの核発熱を $1 \text{ mW}/\text{m}^3$ という制約条件のもとで、高効率な ^{129}I の消滅率、高効率な TBR を得るのに最適なブランケットを提案する。

6.1 前面増倍層付ブランケット

前面増倍層付ブランケットにおいて、 ^{129}I の消滅効率と TBR の高効率化を目的として、増倍材に Pb、Be を用いて検討した。その結果を図 5 に示す。TBR の高効率化には Pb、Be 共に効果があることがわかったが、ローカル TBR の目標値 1.70 を得ることはできなかった。 ^{129}I の消滅効率の向上には Be は有効であり実効半減期を 3 年以下とすることが可能であるが、Pb は効果的でないことがわかった。Be の厚さを大きくすることにより、 ^{129}I の消滅効率は大きくなるが、TBR は Be の厚さが 8 cm のとき最大となり、さらに

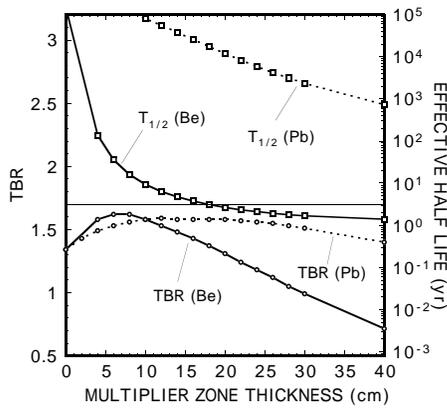


図 5: Effects of front multiplying layers

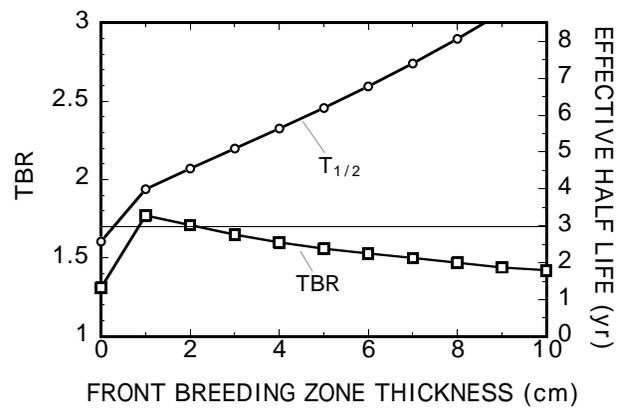


図 6: Effects of front breeding layers

表 1: Effects of front multiplying layers

領域及びその構成	領域厚さ (cm)
プラズマ D,T	105
スタレーブオフ層 VOID	15
第一層 SUS316	1
増倍層 Be	20
トリウム増倍層 Li ₂ O	20
反射体 黒鉛	1
遮蔽体 SUS316:ボロン水=7:3	16
遮蔽体 Pb	8
真空 VOID	51
超電導コイル NbTi	40
TBR	1.3
¹²⁹ I の実効半減期 (年)	2.67
超電導コイルの発熱 (mW/cm ²)	0.92

Be の厚さを大きくすると減少していく。Be 増倍層の厚さを 20 cm 以上とすることにより ¹²⁹I の実効半減期を 3 年以下とする事が可能となる。¹²⁹I の消滅効率と TBR の高効率化に最適な前面増倍層付ブランケットと遮蔽体の全体の構成として表 1 に示すブランケットを提案する。

6.2 前面増殖層付ブランケット

TBR の高効率化を可能とする前面増殖層付ブランケットにおいて、¹²⁹I の消滅効率の向上を目的として、Be 増倍材の後方にグラファイト反射材を設置し検討した。その結果、以下のような成果が得られた。

- 前面増殖層をブランケットに設置することにより、Be 増倍層の厚さを 10cm 以上とすると、ローカル TBR の目標値 1.70 を越えることが可能となる。
- Be 増倍材の後方にグラファイト反射材を設置することによる後方増殖層でのトリチウム生成率はさほど小さくならず、
- Be の厚さを 20 cm 以上にすると、¹²⁹I の実効半減期を 2 年以下、ローカル TBR 1.7 以上を達成できた。

表 2: Effects of front breeding layers

領域及びその構成	case R	case S	case T
領域厚さ (cm)	領域厚さ (cm)	領域厚さ (cm)	領域厚さ (cm)
プラズマ D,T	105	105	105
スタレーブオフ層 VOID	15	15	15
第一層 SUS316	1	1	1
前面増殖層 Li ₂ O (190%濃化)	1	1	1
増倍層 Be	10	20	30
反射体 黒鉛	60	50	40
T増殖層 Li ₂ O (190%濃化)	1	1	1
反射体 黒鉛	1	1	1
遮蔽体 SUS316:ボロン水=7:3	14	14	14
遮蔽体 Pb	3	3	3
真空 VOID	26	26	26
超電導コイル NbTi	40	40	40
TBR	1.52	1.75	1.71
¹²⁹ I の実効半減期 (年)	2.62	1.98	1.84
超電導コイルの発熱 (mW/cm ²)	0.61	0.73	0.91

¹²⁹I の消滅効率と TBR の高効率化に最適な前面増殖層付ブランケットと遮蔽体の全体の構成として表 2 に示す 3 種の構成を提案する。Be 増倍層を 10 cm のブランケットについては、ローカル TBR が 1.70 を越えていないが、Be に要するコストが低いことから、魅力的であると考えられる。

7 結論と今後の課題

前面増殖層付きブランケットにおいて、中性子増殖層の後方に反射材を設置することにより、ローカル TBR の目標値 1.7 を達成しつつ、¹²⁹I の実効半減期を 2 年以下とする事が出来た。また、DD 核融合炉においても ¹²⁹I の実効半減期を 3 年以下とする結果を得ることが出来た。

今後の課題としては、FUSION-40 と同様のエネルギー群構造をもつ、ANISN コードに入力可能な ¹²⁹I の核データを作成し ¹²⁹I の影響も含めた核設計を行う。