

JAERI-M

8896

JXFR, INTOR-Jブランケットのトリチウム
増殖比増加法の検討

1980年6月

飯田 浩正・関 泰

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JXFR, INTOR-Jブランケットのトリチウム
増殖比増加法の検討

日本原子力研究所 東海研究所 核融合研究部

飯田 浩正・関 泰

(1980年5月19日受理)

鉛をPbOあるいは $Pb_{38}Li_{62}$ の型で中性子増倍材として用いることと 6Li を濃縮することにより、JXFRとINTOR-Jブランケットのトリチウム増殖比を増加させることを検討した。JXFRブランケットはPbOを用い 6Li を濃縮することにより1.09から1.17に、INTOR-Jブランケットでは $Pb_{38}Li_{62}$ を用い 6Li を濃縮することにより1.10から1.20程度へ増殖比を増加させられることが分かった。

JAERI-M 8896

Studies on Increasing Tritium Breeding Ratios of JXFR
and INTOR-J Blankets

Hiromasa IIDA and Yasushi SEKI
Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai
Research Establishment, JAERI

(Received May 19, 1980)

Increasing the tritium breeding ratios of JXFR (JAERI Experimental Fusion Reactor) and INTOR-J (Japanese proposal for INTOR) blankets by loading PbO or $Pb_{38}Li_{62}$ as the neutron multiplier and condensing 6Li has been studied. The breeding ratio of JXFR blanket increases from 1.09 to 1.17 in using PbO and condensing 6Li . In INTOR-J blanket the ratio increases from 1.10 to 1.20 in replacing Li_2O by $Pb_{38}Li_{62}$ and condensing 6Li .

Keywords : Tritium Breeding Ratio, Tokamak Fusion Reactor
Neutron Multiplier, Lead, JXFR Blanket, INTOR-J
Blanket

目 次

1. 序	1
2. JXFRのブランケット構造	2
3. PbOを用いた場合のトリチウム増殖比 (JXFR)	2
4. INTOR-Jのブランケット構造	3
5. 冷均材の選択によるトリチウム増殖比への影響 (INTOR-J)	3
6. $Pb_{38}Li_{62}$ を用いた場合のトリチウム増殖比 (INTOR-J)	3
7. ブランケット厚さの効果 (INTOR-J)	4
8. 結 言	4
参考文献	5

CONTENTS

1. Introduction	1
2. JXFR Blanket	2
3. Tritium Breeding Ratio with PbO in JXFR Blanket	2
4. INTOR-J Blanket	3
5. Effect of Coolant Material Choice on Tritium breeding ratio of INTOR-J Blanket	3
6. Tritium Breeding Ratio with $Pb_{38}Li_{62}$ in INTOR-J Blanket	3
7. Effect of Blanket width on Tritium Breeding Ratio	4
8. Summary	4
Reference	5

1. 序

第1世代の核融合炉の燃料であるトリチウムは天然には殆んど存在せず、核融合炉システムの中で再生産する必要がある。このトリチウム再生産は、プラズマの周囲に置かれたブランケットの中にリチウムを装荷し中性子とリチウムの核反応 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$, ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)\text{T}$ を利用して行う。純核融合動力炉では、トリチウム増殖比(トリチウムの生産率と消費率の比)は1.0以上でなければならない。原研で設計が行われた核融合実験炉 JXER¹⁾では増殖比は0.9であったが、以下の理由で已むを得ないと考えられた。

- 1) JXFRではトラス内側が遮蔽専用ブランケットであり、リチウムを装荷できないが、動力炉では炉のサイズが大きくなりこの部分にも装荷できると考えた。この場合同じブランケット(Li₂OをHeで冷却)で増殖比1.09が得られる。
- 2) 年間200g程度のトリチウムを外部から補給するのは可能であろう。
- 3) 中性子増倍材や核分裂物質をブランケットに持ち込みブランケットの構造設計を困難にするよりは実現性の高いものにしておいた方が実験炉段階では得策であろう。
- 4) 構造材の占める体積率が大きいブランケットでは中性子増倍材の効果はあまり期待できない。
- 5) ブランケットの熱・構造設計が進んで構造材の体積率が下がるか、Li₂Oの充填密度が増加できれば高いトリチウム増殖率が得られる。

しかし、その後の設計の進展などから以下の理由でトリチウム増殖率を少しでも高くする事を検討しておく必要が生じた。

- 1) 経済性の観点から動力炉もかなりコンパクトなものにならざるを得ないであろう。その場合トラスの内側に十分な量のリチウムを装荷できるかどうか疑問である。
- 2) トリチウムを外部から補給するのは易しくはない。
- 3) ブランケットの熱・構造設計が現実的になるに伴い、ブランケット構造材の占める体積率が更に増加しつつある。

この報告書では、鉛を中性子増倍材として用い、 ${}^6\text{Li}$ を濃縮した場合のトリチウム増殖比について述べる。一般に重い核は(n, 2n)反応断面積が大きい。鉛は扱い易く、熱中性子の吸収断面積が小さいなどの特性があるため、中性子増倍材とし有効ではないかと思われる。鉛を用いたブランケットは既にNUWMAK²⁾などで提案されており、高いトリチウム増殖比(1.54)が報告されている。しかし、ブランケットの構造組織により鉛の中性子増倍効果は異って来る。高エネルギー領域では中性子と媒質の主な反応は構造材の非弾性散乱と各種しきい値反応、Li₂O, PbO, Pb₃₈Li₆₂などの弾性散乱、各種しきい値反応である。鉛の(n, 2n)反応は構造材の非弾性散乱、しきい値反応と競合する事になる。NUWMAKの様に構造材体積率が極端に小さい場合は鉛の中性子増倍効果がある程度有効なのは当然考えられる事である。ただし、NUWMAKのPb₃₈Li₆₂の相変化を利用して出力平坦化をはかるという設計は、Pb₃₈Li₆₂の保温・予熱を考えただけでも超現実的である³⁾という意見もある。

ここでは、熱・構造設計から見て現実的と考えられるブランケットにおける鉛の効果という意味で、JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR)、国際共同トカマク日本案 INTOR-J の設計の中で行われた、鉛の効果の検討などについて報告する。

計算は比較検討のためであるから全てANISNによる1次元計算であり計算法などは文献1を参照されたい。

2. JXFRのブランケット構造

原研の設計においては一貫して二酸化リチウム (Li_2O) がトリチウム生産親物質として使われている。JXFRのブランケットは压力容器タイプであり、二重壁を持った压力容器の中に Li_2O が装荷される。二重壁の間を通ったHeが容器先端部から内容器に入り Li_2O を冷却する。第1図に示したのはJXFRの代表的なブランケットセルである。容器先端部はドーム状となっており、この部分に装荷される Li_2O はペブル状となっている。これはプラズマに近い部分の発熱密度が高いためその部分の冷却条件を良くするためである。ドーム部はスペースファクタも悪く Li_2O の充填密度も高く採れず高いトリチウム増殖比を得るための障害となっている。ドーム部の後方は胴部となっており、この部分には Li_2O がブロック状となって装荷される。胴部はスペースファクタも良く Li_2O ブロックの充填密度も90%とされている。第2図に1次元計算体系を示す。

なおこのブランケットは冷却材Heの圧力(10気圧)を単独で保持する事ができず互いに隣り合ったセルと押し合い内圧を保持しなければならないという構造設計上の問題点を残している。

3. PbOを用いた場合のトリチウム増殖比 (JXFR)

JXFRで用いられている压力容器タイプで鉛を用いるとすればセラミックにして Li_2O と入れ替えるのが最も簡単と思われる。第1表にPbOの特性を示す。鉛の中性子増倍効果は、高エネルギー中性子の多いプラズマに近い部分に鉛を置かないと期待できないから、ペブル状 Li_2O と置き換えるとする。第2表に示したcase 2～case 6は20%毎にペブル状 Li_2O をPbOに置き替えたものである。標準計算(case 1)に較べトリチウム増殖比は殆んど増加しない事が分る。しかし、 ^7Li の $(n, n'\alpha)$ 反応による寄与が減少し ^6Li の (n, α) 反応の寄与が増大しているから、 ^6Li の濃縮度を高める事はかなり有効なはずである。同表のcase 7～case 10はペブル部の Li_2O を60% PbOに置き替えブロック部の ^6Li を濃縮した場合の計算である。この結果、 ^6Li の同位元素比を約20% (約3倍に濃縮) にすれば、標準計算より7.2% 大きいトリチウム増殖比が得られる事が分った。

ここでは、熱・構造設計から見て現実的と考えられるブランケットにおける鉛の効果という意味で、JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR)、国際共同トカマク日本案 INTOR-J の設計の中で行われた、鉛の効果の検討などについて報告する。

計算は比較検討のためであるから全てANISNによる1次元計算であり計算法などは文献1を参照されたい。

2. JXFRのブランケット構造

原研の設計においては一貫して二酸化リチウム (Li_2O) がトリチウム生産親物質として使われている。JXFRのブランケットは圧力容器タイプであり、二重壁を持った圧力容器の中に Li_2O が装荷される。二重壁の間を通ったHeが容器先端部から内容器に入り Li_2O を冷却する。第1図に示したのはJXFRの代表的なブランケットセルである。容器先端部はドーム状となっており、この部分に装荷される Li_2O はペブル状となっている。これはプラズマに近い部分の発熱密度が高いためその部分の冷却条件を良くするためである。ドーム部はスペースファクタも悪く Li_2O の充填密度も高く採れず高いトリチウム増殖比値を得るための障害となっている。ドーム部の後方は胴部となっており、この部分には Li_2O がブロック状となって装荷される。胴部はスペースファクタも良く Li_2O ブロックの充填密度も90%とされている。第2図に1次元計算体系を示す。

なおこのブランケットは冷却材Heの圧力(10気圧)を単独で保持する事ができず互いに隣り合ったセルと押し合い内圧を保持しなければならないという構造設計上の問題点を残している。

3. PbOを用いた場合のトリチウム増殖比 (JXFR)

JXFRで用いられている圧力容器タイプで鉛を用いるとすればセラミックにして Li_2O と入れ替えるのが最も簡単と思われる。第1表にPbOの特性を示す。鉛の中性子増倍効果は、高エネルギー中性子の多いプラズマに近い部分に鉛を置かないと期待できないから、ペブル状 Li_2O と置き換えるとする。第2表に示したcase 2～case 6は20%毎にペブル状 Li_2O をPbOに置き替えたものである。標準計算(case 1)に較べトリチウム増殖比は殆んど増加しない事が分る。しかし、 ${}^7\text{Li}$ の ($n, n'\alpha$) 反応による寄与が減少し ${}^6\text{Li}$ の (n, α) 反応の寄与が増大しているから、 ${}^6\text{Li}$ の濃縮度を高める事はかなり有効なはずである。同表のcase 7～case 10はペブル部の Li_2O を60% PbOに置き替えブロック部の ${}^6\text{Li}$ を濃縮した場合の計算である。この結果、 ${}^6\text{Li}$ の同位元素比を約20% (約3倍に濃縮) にすれば、標準計算より7.2% 大きいトリチウム増殖比が得られる事が分った。

ここでは、熱・構造設計から見て現実的と考えられるブランケットにおける鉛の効果という意味で、JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR)、国際共同トカマク日本案 INTOR-J の設計の中で行われた、鉛の効果の検討などについて報告する。

計算は比較検討のためであるから全て ANISN による 1 次元計算であり計算法などは文献 1 を参照されたい。

2. JXFR のブランケット構造

原研の設計においては一貫して二酸化リチウム (Li_2O) がトリチウム生産親物質として使われている。JXFR のブランケットは压力容器タイプであり、二重壁を持った压力容器の中に Li_2O が装荷される。二重壁の間を通った He が容器先端部から内容器に入り Li_2O を冷却する。第 1 図に示したのは JXFR の代表的なブランケットセルである。容器先端部はドーム状となっており、この部分に装荷される Li_2O はペブル状となっている。これはプラズマに近い部分の発熱密度が高いためその部分の冷却条件を良くするためである。ドーム部はスペースファクタも悪く Li_2O の充填密度も高く採れず高いトリチウム増殖比を得るための障害となっている。ドーム部の後方は胴部となっており、この部分には Li_2O がブロック状となって装荷される。胴部はスペースファクタも良く Li_2O ブロックの充填密度も 90% とされている。第 2 図に 1 次元計算体系を示す。

なおこのブランケットは冷却材 He の圧力 (10 気圧) を単独で保持する事ができず互いに隣り合ったセルと押し合い内圧を保持しなければならないという構造設計上の問題点を残している。

3. PbO を用いた場合のトリチウム増殖比 (JXFR)

JXFR で用いられている压力容器タイプで鉛を用いるとすればセラミックにして Li_2O と入れ替えるのが最も簡単と思われる。第 1 表に PbO の特性を示す。鉛の中性子増倍効果は、高エネルギー中性子の多いプラズマに近い部分に鉛を置かないと期待できないから、ペブル状 Li_2O と置き換えるとする。第 2 表に示した case 2 ~ case 6 は 20% 毎にペブル状 Li_2O を PbO に置き替えたものである。標準計算 (case 1) に較べトリチウム増殖比は殆んど増加しない事が分る。しかし、 ${}^7\text{Li}$ の ($n, n'\alpha$) 反応による寄与が減少し ${}^6\text{Li}$ の (n, α) 反応の寄与が増大しているから、 ${}^6\text{Li}$ の濃縮度を高める事はかなり有効なはずである。同表の case 7 ~ case 10 はペブル部の Li_2O を 60% PbO に置き替えブロック部の ${}^6\text{Li}$ を濃縮した場合の計算である。この結果、 ${}^6\text{Li}$ の同位元素比を約 20% (約 3 倍に濃縮) にすれば、標準計算より 7.2% 大きいトリチウム増殖比が得られる事が分った。

4. INTOR-Jのブランケット構造

INTOR-Jのreference designではトリチウム再生産を行わないとなっているが、alternativeとしてトリチウム再生産用ブランケットが検討されている。当初JXFRと同じ圧力容器タイプが検討された。JXFRでは胴部は矩形断面であったが、INTOR-Jでは円形とした。これは前述の構造設計上の問題点を取り除くためである。しかし、この場合容器間からの放射線ストリーミングのため容器後方のフランジなどの冷却も必要となり他の問題を惹き起こす事が分った。

次にTube in shellタイプのブランケットが検討された。Tube in shellタイプとは第3図に示す様に容器の中に配管を通しその中を冷却材を流して除熱を行うものである。容器の中には Li_2O が充填され低圧のトリチウムページガスが流される。プラズマに近い部分の発熱密度が高いため容器内の配管はプラズマに近い部分で密となる。核計算上このブランケットは、第1壁部分、 Li_2O 領域前半15 cm部分、同後半30 cm部分、End Wallの4つに分けて取り扱った。このブランケットをトラス全面に設置するとトリチウム増殖比は1.10となる。第3表にINTOR-J Tube in shellタイプ増殖ブランケットの組成を示す。

5. 冷却材の選択によるトリチウム増殖比への影響 (INTOR-J)

Tube in shellタイプのブランケットには軽水を冷却材として想定しているが、重水、Heを使うと増殖比がどうなるかを検討した。第4表に計算結果を示す。同表から分る様に軽水が最も良い。重水よりも軽水の方が良いという事は、中性子吸収の小さな冷却材よりも減速性能の良い冷却材の方が有利である事を示している。減速効果が無いHeの場合は増殖比は更に悪くなる。

6. $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を用いた場合のトリチウム増殖比 (INTOR-J)

鉛とリチウムの合金(alloy)あるいは共融合金(eutectic)を用いた検討はウイスコンシン大字において既に行われている。第5表に示すのはPb, Liおよびそれらの合金の密度である。NUWMAKの設計ではこれらを検討した結果 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を選択し増殖比1.54を得ている。純Liを用いた場合は1.46であるから鉛の中性子増倍効果により0.08増加した事になる。いずれにしてもこの高い増殖比は、少い構造材の体積率(5.7%)と高い親物質体積率(約90%)によっている。

NUWMAKで $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を用いた第1の理由は、その低融点を利用して出力平坦化を企てるというものであったが、鉛の中性子増倍効果も結果的には少し有った。INTOR-Jのように構

4. INTOR-Jのブランケット構造

INTOR-Jのreference designではトリチウム再生産を行わないとなっているが、alternativeとしてトリチウム再生産用ブランケットが検討されている。当初JXFRと同じ圧力容器タイプが検討された。JXFRでは胴部は矩形断面であったが、INTOR-Jでは円形とした。これは前述の構造設計上の問題点を取り除くためである。しかし、この場合容器間からの放射線ストリーミングのため容器後方のフランジなどの冷却も必要となり他の問題を惹き起こす事が分った。

次にTube in shellタイプのブランケットが検討された。Tube in shellタイプとは第3図に示す様に容器の中に配管を通しその中を冷却材を流して除熱を行うものである。容器の中には Li_2O が充填され低圧のトリチウムバージガスが流される。プラズマに近い部分の発熱密度が高いため容器内の配管はプラズマに近い部分で密となる。核計算上このブランケットは、第1壁部分、 Li_2O 領域前半15 cm部分、同後半30 cm部分、End Wallの4つに分けて取り扱った。このブランケットをトラス全面に設置するとトリチウム増殖比は1.10となる。第3表にINTOR-J Tube in shellタイプ増殖ブランケットの組成を示す。

5. 冷却材の選択によるトリチウム増殖比への影響 (INTOR-J)

Tube in shellタイプのブランケットには軽水を冷却材として想定しているが、重水、Heを使うと増殖比がどうなるかを検討した。第4表に計算結果を示す。同表から分る様に軽水が最も良い。重水よりも軽水の方が良いという事は、中性子吸収の小さな冷却材よりも減速性能の良い冷却材の方が有利である事を示している。減速効果が無いHeの場合は増殖比は更に悪くなる。

6. $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を用いた場合のトリチウム増殖比 (INTOR-J)

鉛とリチウムの合金(alloy)あるいは共融合金(eutectic)を用いた検討はウイスコンシン大字において既に行われている。第5表に示すのはPb, Liおよびそれらの合金の密度である。NUWMAKの設計ではこれらを検討した結果 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を選択し増殖比1.54を得ている。純Liを用いた場合は1.46であるから鉛の中性子増倍効果により0.08増加した事になる。いずれにしろこの高い増殖比は、少い構造材の体積率(5.7%)と高い親物質体積率(約90%)によっている。

NUWMAKで $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を用いた第1の理由は、その低融点を利用して出力平坦化を企てるというものであったが、鉛の中性子増倍効果も結果的には少し有った。INTOR-Jのように構

4. INTOR-Jのブランケット構造

INTOR-Jの reference design ではトリチウム再生産を行わないとなっているが、alternative としてトリチウム再生産用ブランケットが検討されている。当初 JXFRと同じ圧力容器タイプが検討された。JXFRでは胴部は矩形断面であったが、INTOR-Jでは円形とした。これは前述の構造設計上の問題点を取り除くためである。しかし、この場合容器間からの放射線ストリーミングのため容器後方のフランジなどの冷却も必要となり他の問題を惹き起こす事が分った。

次に Tube in shell タイプのブランケットが検討された。Tube in shell タイプとは第3図に示す様に容器の中に配管を通しその中を冷却材を流して除熱を行うものである。容器の中には Li_2O が充填され低圧のトリチウムパージガスが流される。プラズマに近い部分の発熱密度が高いため容器内の配管はプラズマに近い部分で密となる。核計算上このブランケットは、第1壁部分、 Li_2O 領域前半 15 cm部分、同後半 30 cm部分、End Wall の4つに分けて取り扱った。このブランケットをトラス全面に設置するとトリチウム増殖比は 1.10 となる。第3表に INTOR-J Tube in shell タイプ増殖ブランケットの組成を示す。

5. 冷却材の選択によるトリチウム増殖比への影響 (INTOR-J)

Tube in shell タイプのブランケットには軽水を冷却材として想定しているが、重水、He を使うと増殖比がどうなるかを検討した。第4表に計算結果を示す。同表から分る様に軽水が最も良い。重水よりも軽水の方が良いという事は、中性子吸収の小さな冷却材よりも減速性能の良い冷却材の方が有利である事を示している。減速効果が無いHe の場合は増殖比は更に悪くなる。

6. $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を用いた場合のトリチウム増殖比 (INTOR-J)

鉛とリチウムの合金 (alloy) あるいは共融合金 (eutectic) を用いた検討はウイスコンシン大字において既に行われている。第5表に示すのはPb, Li およびそれらの合金の密度である。NUWMAK の設計ではこれらを検討した結果 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を選択し増殖比 1.54 を得ている。純Liを用いた場合は 1.46 であるから鉛の中性子増倍効果により 0.08 増加した事になる。いずれにしるこの高い増殖比は、少い構造材の体積率 (5.7%) と高い親物質体積率 (約 90%) によっている。

NUWMAKで $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を用いた第1の理由は、その低融点を利用して出力平坦化を企るというものであったが、鉛の中性子増倍効果も結果的には少し有った。INTOR-Jのように構

造材体積率が高い（20%）ブランケットでこの効果がどの程度あるかを検討した。

第6表に Li_2O と $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の比較を示す。実際のブランケットでは構造が相当異って来ると思われるが、ここでは核的条件の比較のため Li_2O をそっくり $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ に置き替えてある。この結果軽水冷却の場合は殆んど差は無くHe冷却の場合は Li_2O の方が良い。ただし次に述べる様に ${}^6\text{Li}$ を濃縮すれば軽水冷却の場合は $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の方が良くなるはずである。

7. ブランケット厚さの効果 (INTOR-J)

前述の様に計算上親物質を装荷する領域を前半15cmと後半30cmに分けて取扱っている。ブランケットの厚さを増加させるとすれば冷却材の少い後半部の厚さを増加させる事になる。第7表に示したのは後半部の厚さと増殖比の関係である。第1壁、End Wallなども含めたブランケットの全厚さは後半部の厚さに20cmを加えたものとなる。 Li_2O 、 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ ともブランケット厚さを増加するとまだ増殖比は増加する。この表から推定すると、ブランケット厚さを無限大にすると Li_2O の場合1.2弱 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の場合1.25程度が得られる。また厚さを増加させる代りに後半部の ${}^6\text{Li}$ を濃縮しても同様の値が得られるはずである。同表のcase2は ${}^6\text{Li}$ を4倍（約30%）に濃縮した場合であり厚さを20cm厚くした場合とほぼ同じ値が得られた。

8. 結 言

構造材体積率の大きい現実的ブランケットでも ${}^6\text{Li}$ の濃縮度を20~30%に高めればPbの中性子増倍効果との相乗効果によりある程度トリチウム増殖比を増加させる事ができる。今回の検討により以下の事が分った。

- ① 重水冷却よりも軽水冷却の方が高いトリチウム増殖比が得られる。
- ② JXFRのブランケットでは、トリチウム増殖比1.09（トラス内側も増殖ブランケットとした値）が、 PbO の利用と ${}^6\text{Li}$ 濃縮により1.17まで高められる。
- ③ INTOR-Jのtube in shellタイプブランケットでは、増殖比は1.10（トラス内側も増殖ブランケット）であるが、 Li_2O を $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ に置き換え、 ${}^6\text{Li}$ を濃縮すれば1.20程度まで上げられる。

上記の結論は単純に核的な観点からのみ見たもので、 PbO は Li_2O より融点が低く冷却配管を増加させなければならないだろうし（これは増殖比を低下させる）、 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ は相変化に伴う体積変化が大きく極めて難しい構造設計上の問題を惹き起す³⁾など設計上考慮すべき事が他にも有る事を注意しなければならない。またINTOR-Jの様に薄いブランケットの場合はプラズマから遠い部分の ${}^6\text{Li}$ を濃縮するだけでもそれなりの効果が有る事を付言しておかなければならない。

高いトリチウム増殖比を得るためには構造材の体積率の小さなブランケットを得る事が肝要である。特にプラズマに近い部分の構造材体積率を大きくしない事が重要である。現在までも

造材体積率が高い(20%)ブランケットでこの効果がどの程度あるかを検討した。

第6表に Li_2O と $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の比較を示す。実際のブランケットでは構造が相当異って来ると思われるが、ここでは核的条件の比較のため Li_2O をそっくり $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ に置き替えてある。この結果軽水冷却の場合は殆んど差は無くHe冷却の場合は Li_2O の方が良い。ただし次に述べる様に ${}^6\text{Li}$ を濃縮すれば軽水冷却の場合は $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の方が良くなるはずである。

7. ブランケット厚さの効果 (INTOR-J)

前述の様に計算上親物質を装荷する領域を前半15cmと後半30cmに分けて取扱っている。ブランケットの厚さを増加させるとすれば冷却材の少ない後半部の厚さを増加させる事になる。第7表に示したのは後半部の厚さと増殖比の関係である。第1壁、End Wallなども含めたブランケットの全厚さは後半部の厚さに20cmを加えたものとなる。 Li_2O 、 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ ともブランケット厚さを増加するとまだ増殖比は増加する。この表から推定すると、ブランケット厚さを無限大にすると Li_2O の場合1.2弱 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の場合1.25程度が得られる。また厚さを増加させる代りに後半部の ${}^6\text{Li}$ を濃縮しても同様の値が得られるはずである。同表のcase2は ${}^6\text{Li}$ を4倍(約30%)に濃縮した場合であり厚さを20cm厚くした場合とほぼ同じ値が得られた。

8. 結 言

構造材体積率の大きい現実的ブランケットでも ${}^6\text{Li}$ の濃縮度を20~30%に高めればPbの中性子増倍効果との相乗効果によりある程度トリチウム増殖比を増加させる事ができる。今回の検討により以下の事が分った。

- ① 重水冷却よりも軽水冷却の方が高いトリチウム増殖比が得られる。
- ② JXFRのブランケットでは、トリチウム増殖比1.09(トラス内側も増殖ブランケットとした値)が、PbOの利用と ${}^6\text{Li}$ 濃縮により1.17まで高められる。
- ③ INTOR-Jのtube in shellタイプブランケットでは、増殖比は1.10(トラス内側も増殖ブランケット)であるが、 Li_2O を $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ に置き換え、 ${}^6\text{Li}$ を濃縮すれば1.20程度まで上げられる。

上記の結論は単純に核的な観点からのみ見たもので、PbOは Li_2O より融点が低く冷却配管を増加させなければならないだろうし(これは増殖比を低下させる)、 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ は相変化に伴う体積変化が大きく極めて難しい構造設計上の問題を惹き起す³⁾など設計上考慮すべき事が他にも有る事を注意しなければならない。またINTOR-Jの様に薄いブランケットの場合はプラズマから遠い部分の ${}^6\text{Li}$ を濃縮するだけでもそれなりの効果が有る事を付言しておかなければならない。

高いトリチウム増殖比を得るためには構造材の体積率の小さなブランケットを得る事が肝要である。特にプラズマに近い部分の構造材体積率を大きくしない事が重要である。現在までも

造材体積率が高い（20%）ブランケットでこの効果がどの程度あるかを検討した。

第6表に Li_2O と $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の比較を示す。実際のブランケットでは構造が相当異って来ると思われるが、ここでは核的条件の比較のため Li_2O をそっくり $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ に置き替えてある。この結果軽水冷却の場合は殆んど差は無くHe冷却の場合は Li_2O の方が良い。ただし次に述べる様に ^6Li を濃縮すれば軽水冷却の場合は $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の方が良くなるはずである。

7. ブランケット厚さの効果 (INTOR-J)

前述の様に計算上親物質を装荷する領域を前半15cmと後半30cmに分けて取扱っている。ブランケットの厚さを増加させるとすれば冷却材の少ない後半部の厚さを増加させる事になる。第7表に示したのは後半部の厚さと増殖比の関係である。第1壁、End Wallなども含めたブランケットの全厚さは後半部の厚さに20cmを加えたものとなる。 Li_2O 、 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ ともブランケット厚さを増加するとまだ増殖比は増加する。この表から推定すると、ブランケット厚さを無限大にすると Li_2O の場合1.2弱 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ の場合1.25程度が得られる。また厚さを増加させる代りに後半部の ^6Li を濃縮しても同様の値が得られるはずである。同表のcase2は ^6Li を4倍（約30%）に濃縮した場合であり厚さを20cm厚くした場合とほぼ同じ値が得られた。

8. 結 言

構造材体積率の大きい現実的ブランケットでも ^6Li の濃縮度を20~30%に高めればPbの中性子増倍効果との相乗効果によりある程度トリチウム増殖比を増加させる事ができる。今回の検討により以下の事が分った。

- ① 重水冷却よりも軽水冷却の方が高いトリチウム増殖比が得られる。
- ② JXFRのブランケットでは、トリチウム増殖比1.09（トラス内側も増殖ブランケットとした値）が、 PbO の利用と ^6Li 濃縮により1.17まで高められる。
- ③ INTOR-Jのtube in shellタイプブランケットでは、増殖比は1.10（トラス内側も増殖ブランケット）であるが、 Li_2O を $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ に置き換え、 ^6Li を濃縮すれば1.20程度まで上げられる。

上記の結論は単純に核的な観点からのみ見たもので、 PbO は Li_2O より融点が低く冷却配管を増加させなければならないだろうし（これは増殖比を低下させる）、 $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ は相変化に伴う体積変化が大きく極めて難しい構造設計上の問題を惹き起す³⁾など設計上考慮すべき事が他にも有る事を注意しなければならない。またINTOR-Jの様に薄いブランケットの場合はプラズマから遠い部分の ^6Li を濃縮するだけでもそれなりの効果が有る事を付言しておかなければならない。

高いトリチウム増殖比を得るためには構造材の体積率の小さなブランケットを得る事が肝要である。特にプラズマに近い部分の構造材体積率を大きくしない事が重要である。現在までも

この点に関して配慮はされてきたが、今後さらに重点を置いて考慮される必要が有る。具体的には次の様な事が現在検討されている。INTOR-Jの様に動力炉で無いものは冷却材の圧力は高くなくても良く、従って配管肉厚も現設計より薄くできるはずである。また Li_2O の許容温度が高くなれば冷却配管はもっと少く出来るであろう。その他冷却材温度、ブランケット出力密度（炉出力）も検討対象である。

本検討を行うに当って迫炉設計研究室長に適切な御指導を頂き感謝します。

参 考 文 献

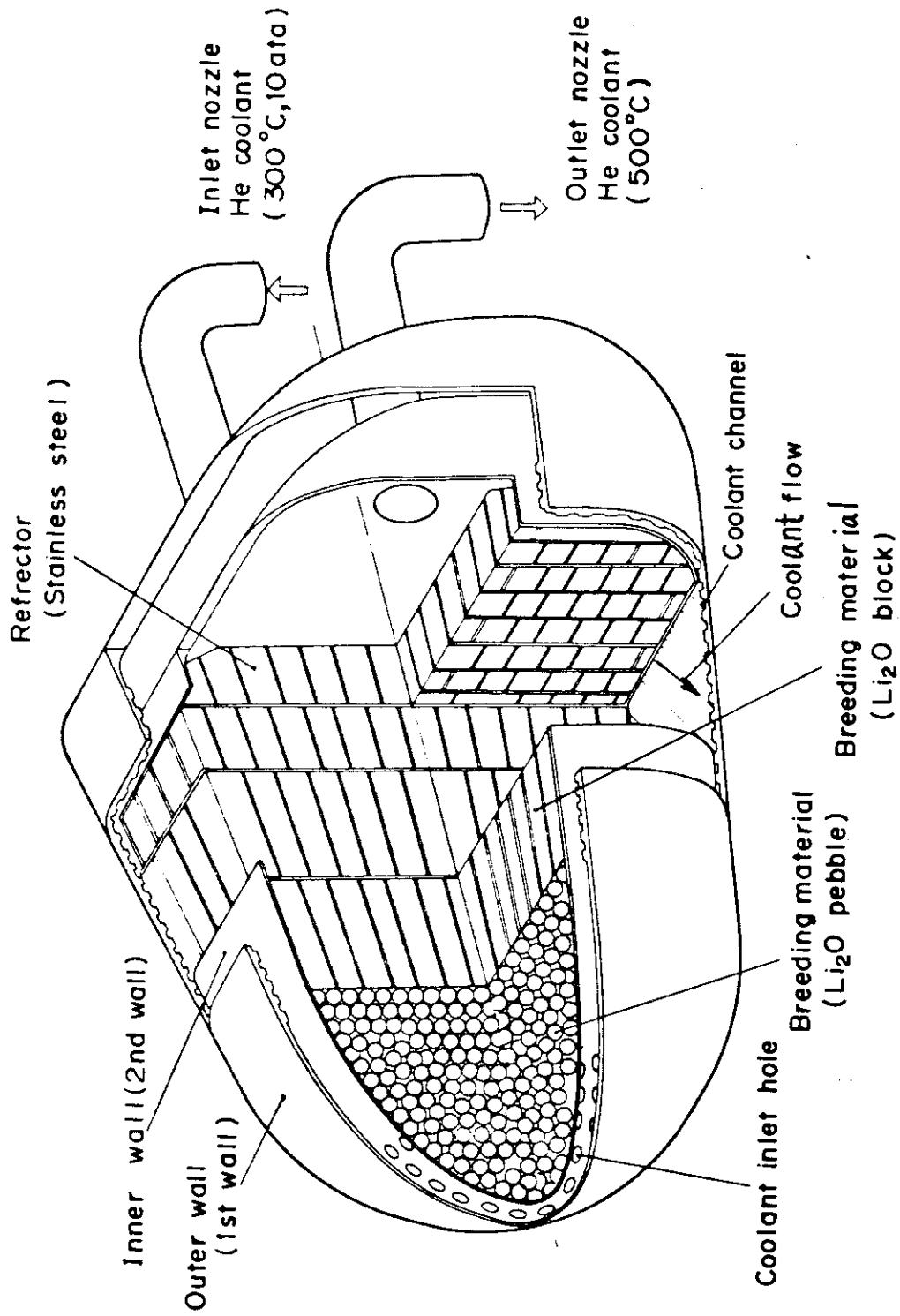
- 1) 迫淳, 他「核融合実験炉第1次予備設計」, JAERI-M 7300 (1977).
- 2) B.Badger, et al., "NUWMAK" UWFDM-330, (1979).
- 3) 迫淳, 私信.

この点に関して配慮はされてきたが、今後さらに重点を置いて考慮される必要が有る。具体的には次の様な事が現在検討されている。INTOR-Jの様 to 動力炉で無いものは冷却材の圧力は高くなくても良く、従って配管肉厚も現設計より薄くできるはずである。またLi₂Oの許容温度が高くなれば冷却配管はもっと少く出来るであろう。その他冷却材温度、ブランケット出力密度（炉出力）も検討対象である。

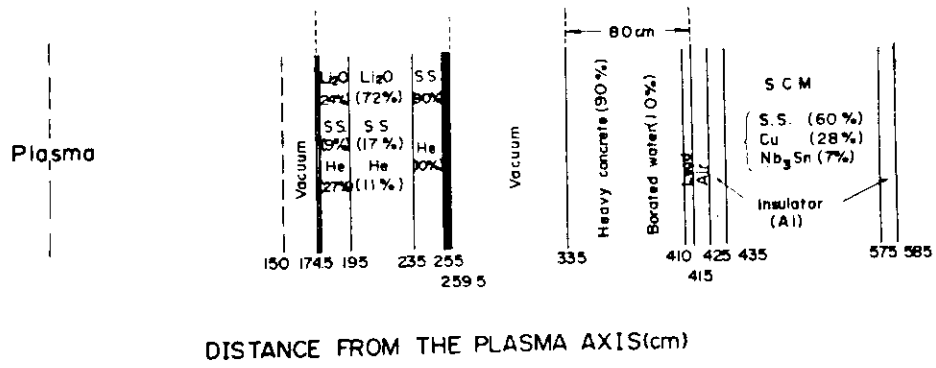
本検討を行うに当って迫炉設計研究室長に適切な御指導を頂き感謝します。

参 考 文 献

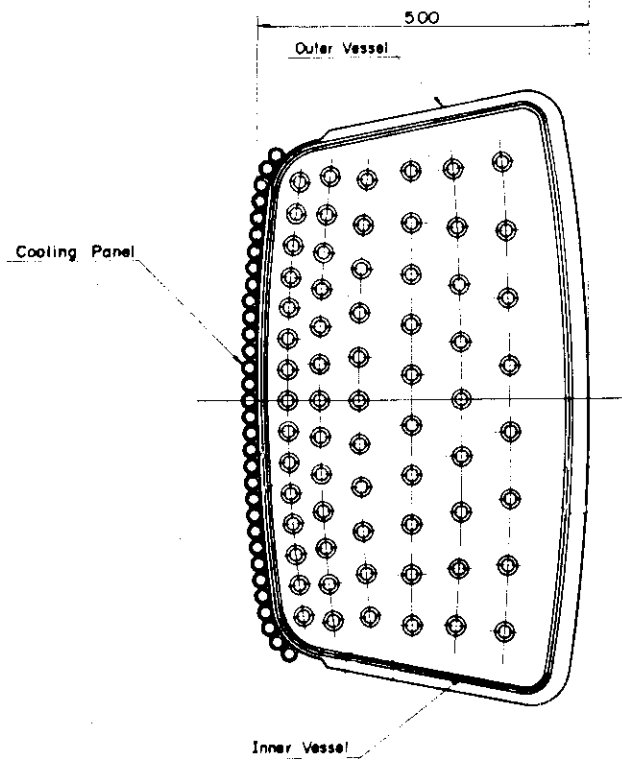
- 1) 迫淳, 他「核融合実験炉第1次予備設計」, JAERI-M 7300 (1977).
- 2) B.Badger, et al., "NUWMAK" UWFD M-330, (1979).
- 3) 迫淳, 私信.



第1図 JXFRの代表的増殖ブランケット



第2図 JXFRトリチウム増殖比1次元計算モデル



第3図 INTOR-J Tube in shellタイプブランケット

第1表 PbO の物理的特性

形状：黄色粉末

融点：880 °C

沸点：1470 °C

比重：9.3 ~ 9.5 g/cc

第2表 PbO及びLi₂Oを装荷し ⁶Liを濃縮した場合の
トリチウム増殖比 (JXFR)

	Ratio of Li ₂ O Substituted by PbO in Pebble Region	Enrichment of ⁶ Li in Block Region	Tritium Breeding Ratio		
			⁷ Li	⁶ Li	Total
Case 1	0 %	7.42 %	0.257	0.835	1.09 ₂
Case 2	20 %	7.42 %	0.225	0.874	1.09 ₉
Case 3	40 %	7.42 %	0.196	0.910	1.10 ₆
Case 4	60 %	7.42 %	0.169	0.942	1.11 ₁
Case 5	80 %	7.42 %	0.151	0.952	1.10 ₃
Case 6	100 %	7.42 %	0.120	0.984	1.10 ₄
Case 7	60 %	14.84 %	0.155	1.003	1.15 ₈
Case 8	60 %	22.26 %	0.141	1.030	1.17 ₁
Case 9	60 %	29.68 %	0.127	1.044	1.17 ₁
Case 10	60 %	37.10 %	0.110	1.053	1.16 ₃

第3表 INTOR-J Tube in shellタイプ増殖ブランケットの組成

前半部 15 cm	トリチウム生産親物質	0.51
	冷却材	0.11
	構造材	0.20
	Void	0.18
後半部 30 cm	トリチウム生産親物質	0.64
	冷却材	0.04
	構造材	0.10
	Void	0.22

第4表 冷却材の選択による増殖比への影響

トリチウム増殖比 (T . B . R)

*		^7Li	^6Li	計
Case 1	前	0.128	0.608	0.736
	後	0.062	0.299	0.361
	計	0.190	0.907	1.097
Case 2	前	0.130	0.465	0.595
	後	0.063	0.414	0.477
	計	0.193	0.879	1.072
Case 3	前	0.136	0.438	0.574
	後	0.073	0.373	0.446
	計	0.209	0.811	1.020

*

	トリチウム生産親物質	冷却材
Case 1	Li_2O	H_2O
2	Li_2O	D_2O
3	Li_2O	He

第5表 鉛, リチウム及びそれらの合金の密度²⁾

<u>Material</u>	<u>Solid Density-g/cm³</u>	<u>Liquid Density at 500°C-g/cm³</u>
Pb	11.34 ^(a)	10.45 ^(b)
PbLi	8.1 ^(c)	6.31 ^(d)
Pb ₃₈ Li ₆₂ -eutectic	6.5 ^(e)	5.01 ^(d)
Li ₅ Pb ₂	5.33 ^(c)	4.04 ^(d)
Li	0.534 ^(a)	0.485 ^(b)

(a) From CRC Handbook of Chemistry and Physics, 56th Ed. pp. B-104, 107.

(b) For Pb

$$\rho_{\text{Pb}} = 10.71 - 0.00139 (t-327) \quad 327^\circ\text{C} < t < 800^\circ\text{C}$$

For Li

$$\rho_{\text{Li}} = 0.515 - 1.01 \times 10^{-4} (t-200) \quad 200^\circ\text{C} < t < 1600^\circ\text{C}$$

These formulas giving the liquid metal density as a function of temperature are from p. B-240 of CRC Handbook of Chem. and Phys.

(c) From Gmelins Handbuch Der Anorganischen Chemie, Blei: Teil C3, #47, page 982

(d) Calculated assuming ideal solution of Pb and Li.

(e) Interpolated between the experimental values of 8.1 for PbLi and 5.33 for Li₅Pb₂.

第6表 Li_2O , $\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$ を装荷した場合の比較

トリチウム増殖比 (T . B . R)

*		^7Li	^6Li	計
Case 1	前	0.128	0.608	0.736
	後	0.062	0.299	0.361
	計	0.190	0.907	1.097
Case 2	前	0.136	0.438	0.574
	後	0.073	0.373	0.446
	計	0.209	0.811	1.020
Case 3	前	0.049	0.644	0.693
	後	0.024	0.375	0.399
	計	0.073	1.019	1.092
Case 4	前	0.052	0.397	0.449
	後	0.029	0.354	0.383
	計	0.081	0.751	0.832

*

	トリチウム生産親物質	冷却材
Case 1	Li_2O	H_2O
2	Li_2O	He
3	$\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$	H_2O
4	$\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}$	He

第7表 ブランケット厚さのトリチウム増殖比に与える影響

	ブランケット後半部厚さ	T . B . R		(^6Li を4倍に濃縮)
	(cm) *	$\text{Li}_2\text{O}(\text{H}_2\text{O})$	$\text{Pb}_{38}\text{Li}_{62}(\text{H}_2\text{O})$	
Case 1	30 cm	1.10	1.09	
Case 2	30 cm		1.20	
Case 3	40 cm	1.13	1.15	
Case 4	50 cm	1.15	1.19	

* ブランケットのTotal厚さは後半部厚さ+20 cm