

核融合炉ブランケット構成のトリチウム増殖比への影響

Effect of Blanket Structure on Tritium Breeding Ratio in Fusion Reactor

核融合炉のブランケットは、燃料の一つであるトリチウムを生成するという役割をもっている。トリチウムの消費率以上の生成率をもつブランケットを開発することが課題である。トリチウム増殖比に大きな影響を与える第一壁部では、その構成及び増殖領域では中性子増倍材と ${}^6\text{Li}$ の富化度についてトリチウム増殖比への影響を1次元円柱モデルで検討した。その結果、以下の結論を得た。

第一壁保護材SiCは、厚さ1cmの変化で増殖比0.05減少する。第一壁構造材としてはSUSが適し、第一壁冷却材としてはヘリウムガス、重水、軽水の順に適する。軽水では実効厚さを減らす工夫が必要である。中性子増倍材としてBeが通しており、 ${}^6\text{Li}$ を50%濃縮すると増殖比が最も高くなる。

関 泰* Yasushi Seki
真木 紘一** Kôichi Maki
岡崎隆司*** Takashi Okazaki

1 緒 言

核融合炉では、プラズマの外側をブランケットが取り巻いている。このブランケットは、主として次の三つの重要な役割をもっている。

- (1) 現在一般的に考えられている核融合炉は、重水素とトリチウムを燃料とするものである。その核融合反応で消費される燃料の一つであるトリチウムを生成すること。
- (2) 重水素とトリチウムの核融合反応では、17.6MeVのエネルギーが放出される。この反応で生成される中性子は、全反応エネルギーの80%(14.1MeV)を運動エネルギーとして持っている。この運動エネルギーを熱エネルギーに変換して採り出すこと。
- (3) 核融合反応で放出される中性子、及びその中性子が物質と相互作用することにより発生するガンマ線を遮蔽すること。

この中で(2)、(3)は、ブランケットの外側を取り巻いている遮蔽体が受け持つこともできるが、(1)はブランケットだけがもつ役割である。トリチウムは、天然には存在しない核種であるため、核融合炉で消費される量以上のトリチウムを生成できるブランケットを開発することが重要な課題である。

ブランケット内には、通常、リチウム又はリチウムの化合物、例えば Li_2O 、 LiAlO_2 、 Li_2SiO_3 などが充てんされている¹⁻³⁾。核融合反応で14.1MeVのエネルギーをもって放出される中性子を、リチウムと反応させることによってトリチウムを生成する。天然リチウムには、 ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ がそれぞれ7.4%、92.6%含まれ、中性子と ${}^7\text{Li} + n \rightarrow \alpha + \text{T}$ 、 ${}^7\text{Li} + n \rightarrow n + \alpha + \text{T}$ と反応してトリチウムを生成する。核融合反応では、1個のトリチウムが消費されて、1個の中性子が放出される。したがって、核融合反応で生成する1個の中性子によって生成できるトリチウムの個数を「トリチウム増殖比」と呼ぶ。 ${}^7\text{Li}$ は中性子と反応し、トリチウムの外に中性子を生成する。この中性子が再び ${}^6\text{Li}$ と反応し、もう一度トリチウムを生成するため、トリチウム増殖比として1.0を超える可能性が生じる。しかし、 ${}^7\text{Li}$ のトリチウム生成反応は、しきい値 $\sim 2.5\text{MeV}$ で、その反応断面積も ~ 0.4 バーン(1バーン $=10^{-24}\text{cm}^2$)と小さい。そのため、中性子がリチウムと反応する前に、第一壁を通過し減

速や捕獲反応を受けるので、 ${}^7\text{Li}$ の反応が少なくなり、トリチウム増殖比が小さくなる。したがって、トリチウム増殖比1.0を超えるためには、構造上の工夫が必要である⁴⁾。

また、核融合炉の設計の進展に伴い、増殖比を低下させる要因となる、以下の項目に対する要求が強くなってきた。

- (1) 第一壁保護壁
プラズマからの放出粒子が第一壁に衝突すると、エロージョンと呼ばれる現象により第一壁が損耗する。そこで、第一壁に保護壁を装着しているが、損耗に耐えるため保護壁の厚さの増加。
- (2) 第一壁構造材
冷却材の内圧、熱応力、電磁力に耐えるため、構造材厚さの増加。
- (3) ブランケット容器
内圧、自重、熱応力及び電磁力に耐えるための厚さの増加。
以上の要求は、プラズマとトリチウム増殖領域の間に、より多くの構造材が入るため、中性子がより大きく減速され、吸収される。その結果、トリチウム増殖比の目標値^{5),6)}を達成するのが更に難しくなる。

本研究の目的は、ブランケット構成材料がトリチウム増殖比に与える影響を評価し、特に、第一壁部ではその構成、並びに増殖領域では中性子増倍材及び ${}^6\text{Li}$ の濃縮度(以下、 ${}^6\text{Li}$ の富化度という。)に関して、ブランケットの構成及び材料を選択する指針を示すことである。

以下、この目的に沿って、トリチウム増殖比の計算モデル、それを用いた検討結果、及びトリチウム増殖比を向上させるための技術課題について述べる。

2 計算モデル

2.1 トリチウム増殖比

プラズマ内では、重水素DとトリチウムTの核融合反応でトリチウムが1個消費され、同時に α 粒子と中性子nが1個生成される。すなわち、



* 日本原子力研究所大型トカマク開発部 工学博士 ** 日立製作所エネルギー研究所 *** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

ブランケット内では、核融合反応で生成された中性子がリチウムと次のように反応する。



トリチウム増殖比は、(2)式と(3)式によるトリチウム生成率を(1)式によるトリチウム消費率で割った値として定義される。

トリチウム増殖比の向上を図る方法として、次の三つの方法がある。

- (1) ${}^7\text{Li}$ のトリチウム生成反応の増加を図る方法
- (2) ${}^6\text{Li}$ のトリチウム生成反応の増加を図る方法
- (3) 中性子をリチウムと反応させる前に増倍する方法

(1)の場合には、緒言で述べたように、 ${}^7\text{Li}$ の反応が増殖比1.0を超える可能性を与えている。(3)式で分かるように、しきい値反応であるため中性子の減速を抑えることが必要である。そのため、プラズマと増殖領域間の物質を極力減らす構造上の工夫が必要である。(2)の場合には、 ${}^6\text{Li}$ の(2)式の反応は、250keVでその反応断面積3バーンの共鳴があり、熱中性子に対しては953バーンという大きな反応断面積をもつ。したがって、中性子が十分減速された領域、すなわちプラズマから遠い領域で ${}^6\text{Li}$ の原子数密度を高くする(${}^6\text{Li}$ の富化度を上げる)ことにより、増殖比を向上できる可能性がある。(3)については、リチウムと反応させる前に、BeやPbなどの(n, 2n)反応を利用して中性子を増倍させることによって、増殖比を向上できる可能性がある。(n, 2n)反応で生成される中性子のエネルギーは、(3)式の反応の起こる確率が大きいエネルギー領域よりも低くなるので ${}^7\text{Li}$ の反応には期待できない。そのため、 ${}^6\text{Li}$ の富化度を上げたほうが効果大きい。また、(n, 2n)反応もしきい値反応であるので、プラズマと増殖領域間の物質を減らす構造上の工夫が必要である。

2.2 核融合実験炉のブランケット部概要

検討対象としたのは、日本原子力研究所で概念設計が進められている出力440MWの核融合実験炉⁷⁾で、その炉心構成を図1に、ブランケット部を図2に示す。この炉の第一壁部及び増殖領域部は次に述べるような特徴をもつ。

(1) 第一壁と増殖領域との分離

増殖領域は炉の全寿命の間交換なしで使用できるが、第一壁は荷電粒子の照射で損耗するため、炉の寿命中数回交換しなければならない。このため増殖領域と分離し、第一壁だけ

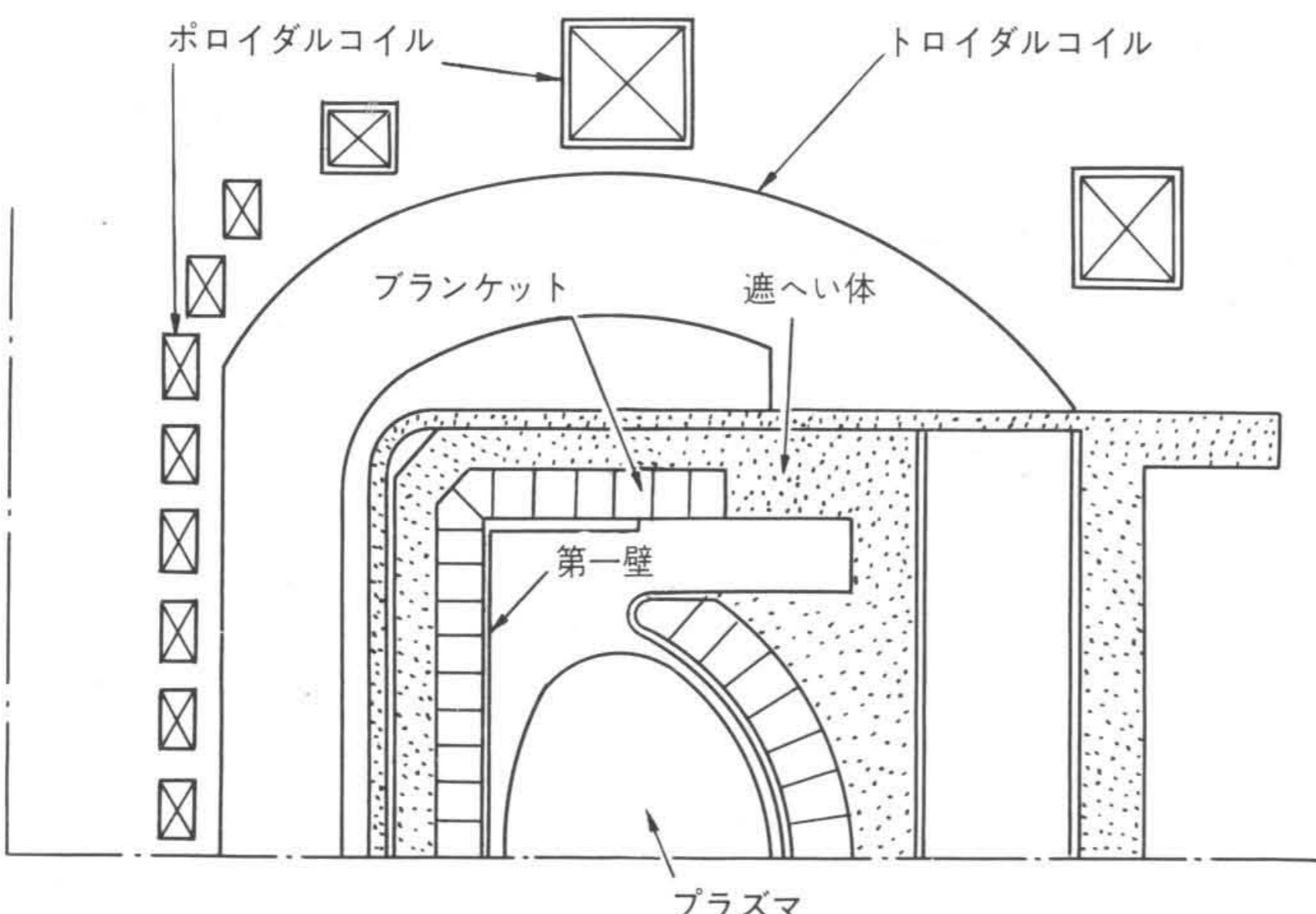


図1 FER(核融合実験炉)⁷⁾のポロイダル断面図 プラズマ主半径5.5m, プラズマ副半径1.1m, プラズマの非円形度1.5の装置のトロイダルコイル間の断面を示す。

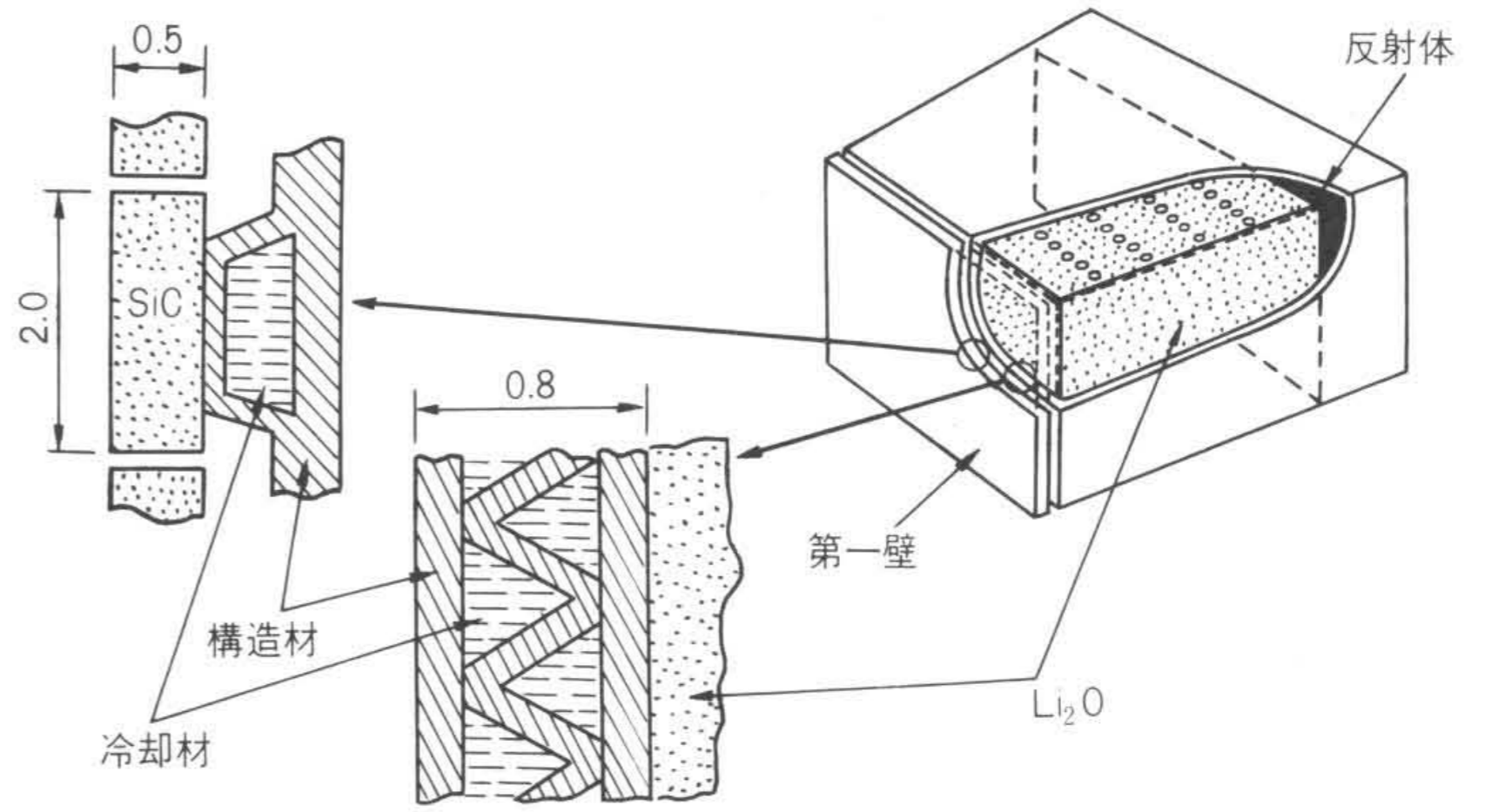


図2 ブランケットの概念図(単位:cm) 第一壁は冷却管群で構成され、前面に保護材SiCが装着されている。ブランケット容器を冷却しなければならないので、断面に冷却材流路がある。この図は第一壁と増殖領域を分離し、第一壁だけ交換できる構造となっている。

交換できる構造とする。

(2) 第一壁保護材にSiC(炭化ケイ素)を使用

プラズマ中への不純物混入対策上、低原子番号核種であること、荷電粒子の照射による損耗率が比較的小さいこと、高融点で熱伝導率が高い、という点からSiCを保護材に使用する。

2.3 1次元円柱モデル

以上述べた核融合炉の炉心部をモデル化する。図1のプラズマ中心をZ軸として、図3のように1次元円柱モデル化する。プラズマ中心から半径方向にr座標をとり、各領域ごとに示すと図3の下図のようになる。プラズマ中で核融合反応で発生する中性子を中性子源として、1次元輸送コードANISN⁸⁾により中性子束を求めた。その際に使用した群定数は、日本原子力研究所の関らによって作成されたGICX40⁹⁾である。

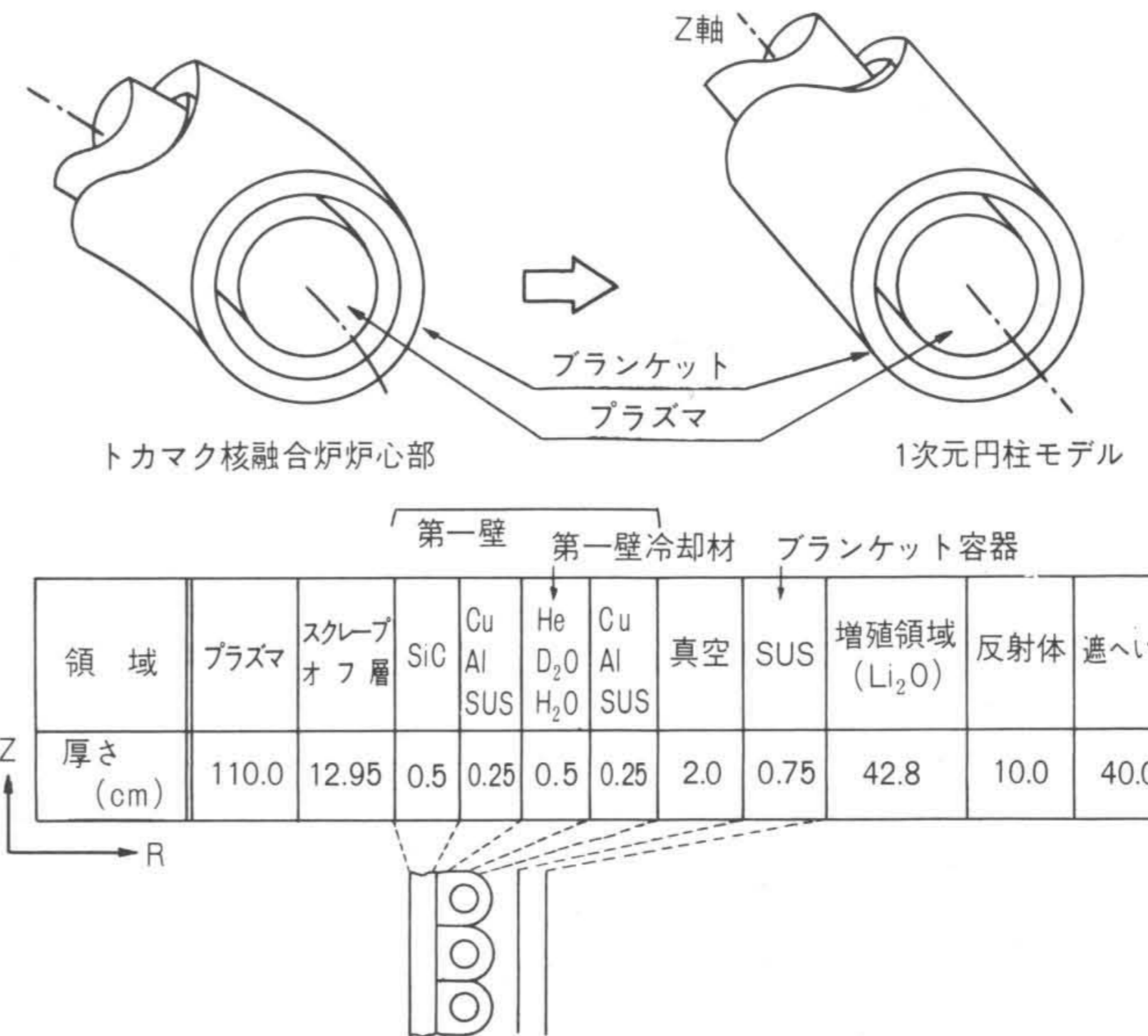


図3 1次元円柱モデル プラズマ中心をZ軸として、同心円状に異なる物質で構成されると近似しモデル化した。

3 結果と検討

3.1 第一壁構成の影響

(1) 保護材SiCの増殖比への影響

第一壁の保護材であるSiCの厚さを0.5cm, 1.0cm, 1.5cmと変えたときの増殖比の変化を示すと図4のようになる。同図

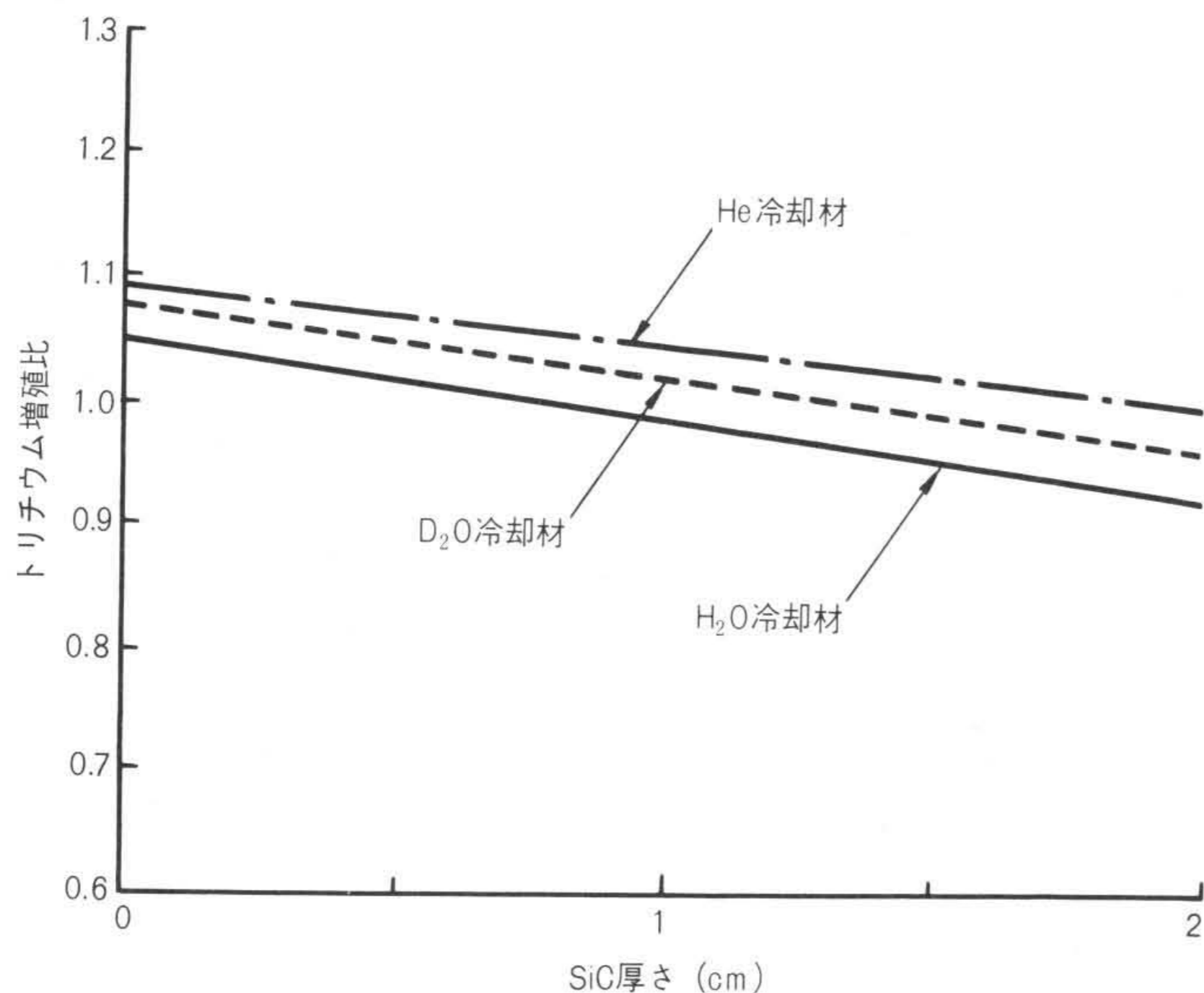


図4 第一壁保護材SiC厚さの変化に対するトリチウム増殖比の変化
第一壁冷却材へリウムガス、重水、軽水の各ケースについて求めたものであるが、SiC厚さ1cm変化に対する増殖比の変化は各ケースとも同じで、 -0.05 となる。

は、第一壁の異なる冷却材について示したものであるが、どの冷却材に対しても増殖比の変化は直線的である。SiC厚さ1cmに対する増殖比の変化は、 -0.05 である。

(2) 第一壁構造材の増殖比への影響

第一壁には、プラズマからの入熱として $\sim 25\text{W}/\text{cm}^2$ の熱流束と、中性子とガンマ線による核発熱密度 $\sim 10\text{W}/\text{cm}^3$ の熱が発生する。したがって、冷却管を構成する材料としては熱伝導率の高いものが望ましい。この点からCuとAlを選んだ。また、核分裂炉で使用され照射特性などのデータの豊富なSUSも候補材として挙げた。Cu, Al, SUSを第一壁構造材に用いて、その厚さを変えたときの増殖比の変化を図5に示す。Cuは厚さの変化に対して増殖比の減少がAl, SUSと比べて著しい。これは、Cuの非弾性散乱断面積が7 MeV以上の高エネルギー一部でSUS, Alに比べて1.5倍と大きく、全エネルギーにわたって中性子吸収断面積がAl, SUSより1けた大きいためである。同図から、各材料厚さ1cmについての増殖比の変化をまとめると、SUSでは、 -0.03 、Alでは -0.04 、Cuでは -0.13 となり、Cuは適さない。

(3) 第一壁冷却材の増殖比への影響

第一壁冷却材として、ヘリウムガス、重水及び軽水が挙げられる。これらの材料による冷却層の厚さの変化に対する増殖比の変化を示すと図6のようになる。ヘリウムガスは気体であるため個数密度が固体に比べて2~3けた小さく、増殖比への影響はほとんどない。軽水と重水を比べると、軽水のほうが中性子減速効果が大きいため、 ${}^7\text{Li}$ の反応の寄与を小さくする。そのため、同図で示すように、軽水のほうが増殖比をより減少させる。各冷却材の層厚さ1cm変化したときの増殖比の変化を求めると、Heでは 0.0 、 D_2O では -0.02 、 H_2O では -0.09 となる。

3.2 増殖領域構成の増殖比への影響

(1) 中性子増倍層厚さの影響

中性子増倍材を用いる方法は、2章の2.1節で述べたように、増殖比を向上させる有力な手段である。中性子増倍材としての条件は、 $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ などの反応断面積が大きだけでなく、中性子吸収断面積、 (n, p) 、 (n, α) などの荷電粒子生成断面積が小さいことである。利用できる材料としては、

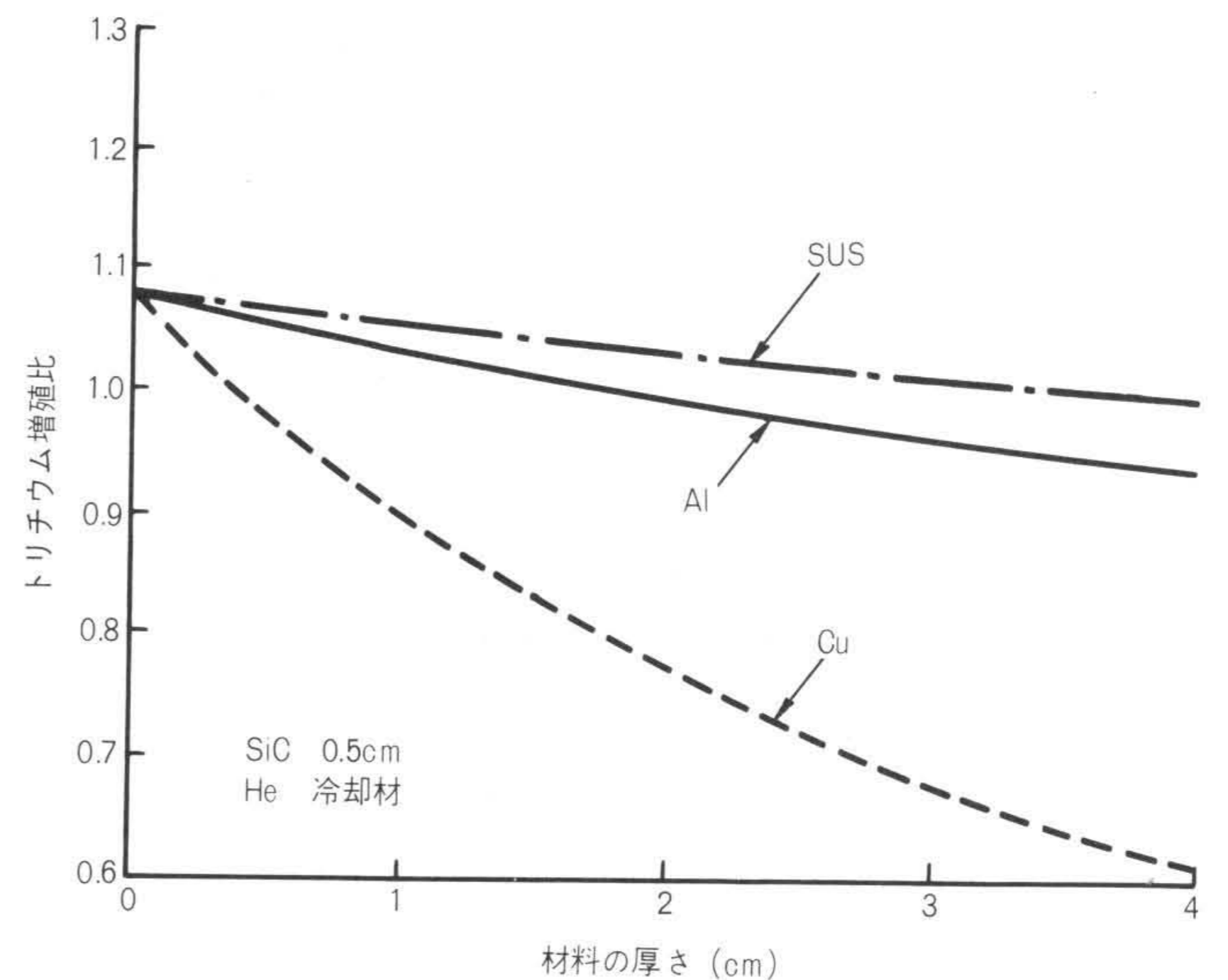


図5 第一壁構造材厚さのトリチウム増殖比への影響 SUSは厚さ1cmにつき増殖比を 0.03 下げ、Alは1cmにつき 0.04 下げ、Cuは1cmにつき 0.13 下げる。Cuは増殖比の点から不適當である。

PbやBeがある。両方とも大きな $(n, 2n)$ 反応断面積をもち、Pbではしきい値8 MeV、Beではしきい値2 MeVである。中性子増倍層厚さを変えたときのトリチウム増殖比の変化を図7に実線で示す。中性子増倍層厚さが5 cm以下ではBeのほうがPbより効果が大きい。5 cm以上ではPbのほうが効果が大きく、約10cmで最大の増殖比を与える。一般的には、Beは、Pbより原子数密度が大きく、しきい値が低いため、中性子増倍効果としてはPbよりも大きいことが示されている²⁾。しかし、本検討結果では、増倍層厚さが5 cm以上となると、BeとPbの関係が逆になる。本検討で対象としたブランケットでは、第一壁と増殖領域とが分離されている。したがって、文献2)の場合よりもプラズマと増倍層の間に構造材が実効的に厚く存在する。BeはPbよりも中性子の減速効果が大きく、二次中性子は後方(プラズマ方向)へ向かう確率が高い。そこで、Beを増倍層に用いた場合には、後方へ向かう中性子が第一壁部で吸収されるため、中性子増倍効果が半減する。以上が、第一

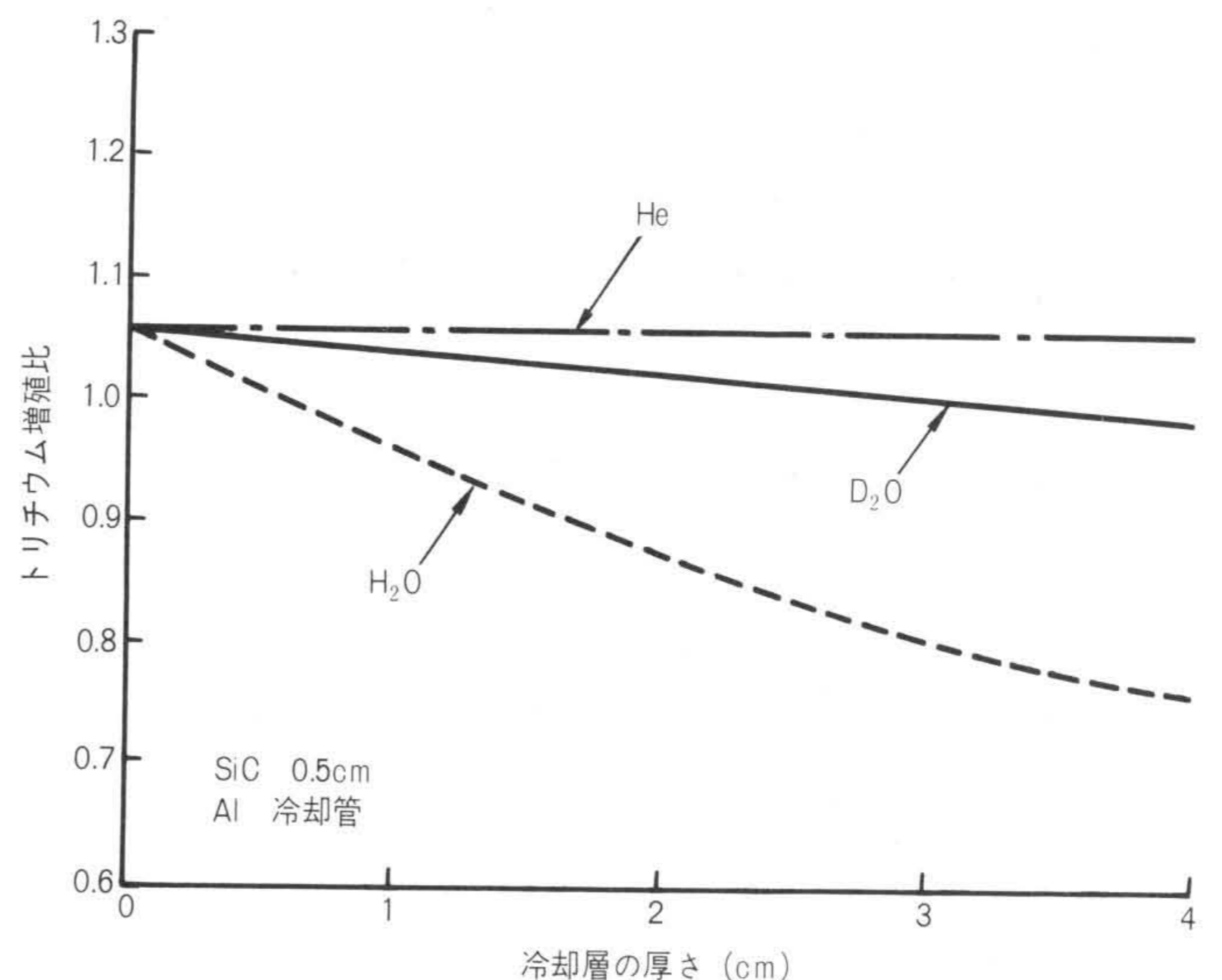


図6 第一壁冷却材厚さのトリチウム増殖比への影響 ヘリウムガスは増殖比に影響を与えない。重水は冷却層厚さ1cmにつき増殖比を 0.02 下げ、軽水は1cmにつき 0.09 下げる。

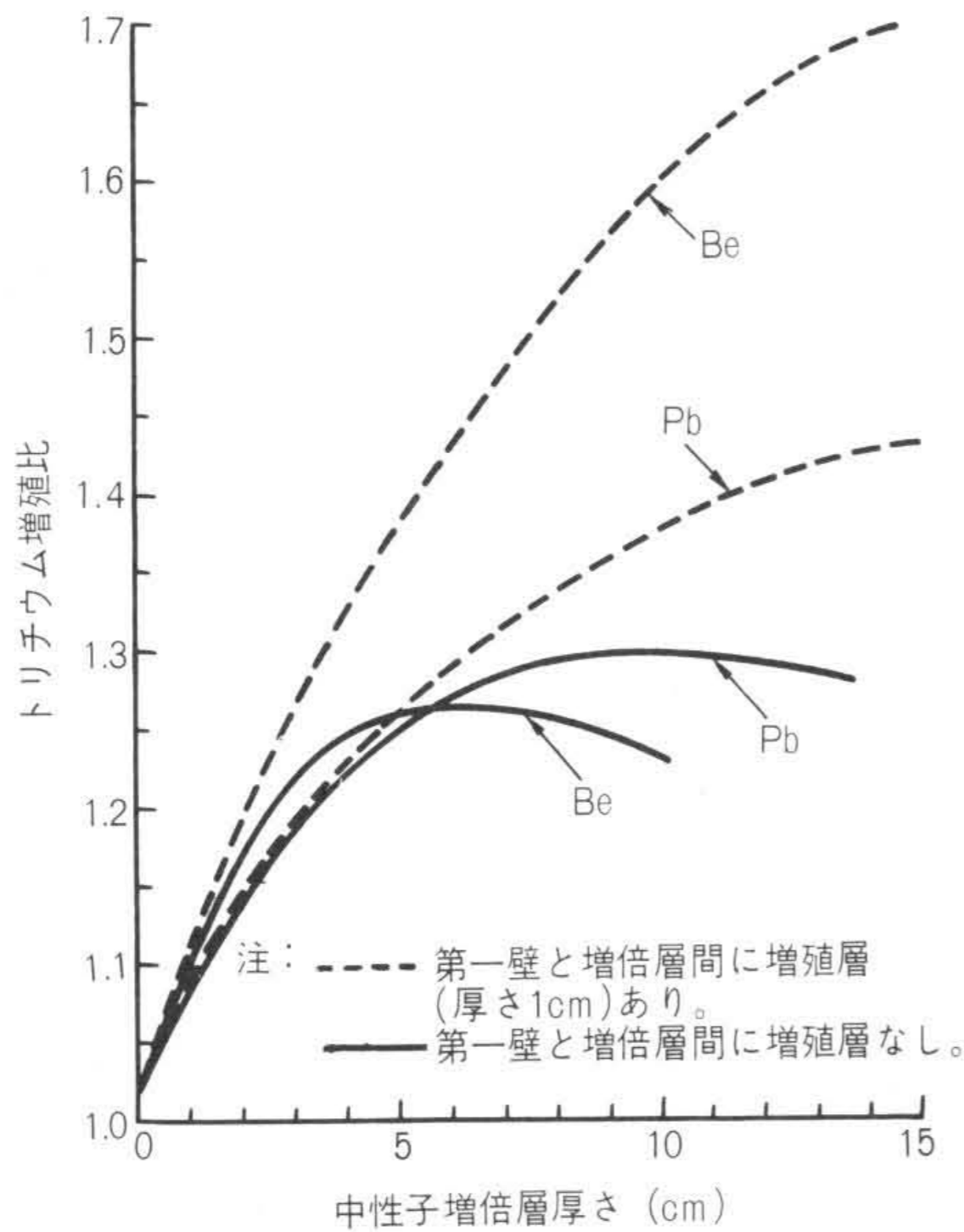


図7 中性子増倍層(Pb, Be)厚さのトリチウム増殖比への影響
第一壁と増倍層間に増殖層がない場合は、Be厚さ6cmのとき増殖比が最大となり、Pbは厚さが10cmのとき増殖比が最大となる。第一壁と増倍層間に増殖層がある場合は、Be、Pbとも大きな増殖比が得られ、特にBeは優れており、中性子増倍材に適している。

壁部構造材の厚い体系でのBeの中性子増倍効果が小さい理由である。後方へ向かう中性子の吸収による増倍効果の減少は、Pbの場合もBeより少ないが存在する。したがって、中性子増倍材を有効に使用するには、第一壁と中性子増倍層の間に薄いトリチウム増殖層を設置することにより、一例を同図に破線で示すように大きな増殖比が得られる。以上から、中性子増倍効果の大きいBeのほうが増殖比の向上という点で優れており、しかも融点が高く、熱伝導率が大いという利点を備えている。

(2) ${}^6\text{Li}$ の富化度の増殖比への影響

天然リチウムには ${}^6\text{Li}$ が7.4%含まれている。2.1節で述べたように、 ${}^6\text{Li}$ の熱中性子に対する大きな反応断面積を利用するためには、反射体近傍の ${}^6\text{Li}$ の富化度を上げればよい。この効果を検討するため、反射体側 $\frac{1}{3}$ の増殖領域、反射体側 $\frac{2}{3}$ の増殖領域、全領域の ${}^6\text{Li}$ の富化度を変えたときの増殖比の変化を図8に示す。富化度50%以下では、3ケースとも同様に増殖比の向上を示す。50%以上では、全領域の富化度を上げると、逆に増殖比が減少する。これは、プラズマに近い領域の ${}^7\text{Li}$ の寄与が減少したためである。また、 ${}^6\text{Li}$ の富化度を50%以上に高くしても増殖比は向上しない。低エネルギー領域での ${}^6\text{Li}$ の大きなトリチウム生成断面積により、反応が飽和しているからである。以上より、 ${}^6\text{Li}$ 富化度は50%程度で最大の増殖比の向上が得られ、天然リチウムの場合と比較して、0.04高くなる。

4 結 言

核融合炉でのブランケット構成、特に第一壁部では構成材料について、増殖領域では中性子増倍材と ${}^6\text{Li}$ の富化度について、トリチウム増殖比への影響を1次元円柱モデルを用いて検討した。その結果、次の結論を得た。

- (1) プラズマ中への不純物混入対策及び熱特性の点で優れているSiCが第一壁保護壁に用いられる。SiCの厚さ1cm変化に対してトリチウム増殖比は0.05減少する。
- (2) 第一壁構造材としては、増殖比の点からSUSが適している。Cuは熱伝導率が高く、冷却の面からは好ましいが、増

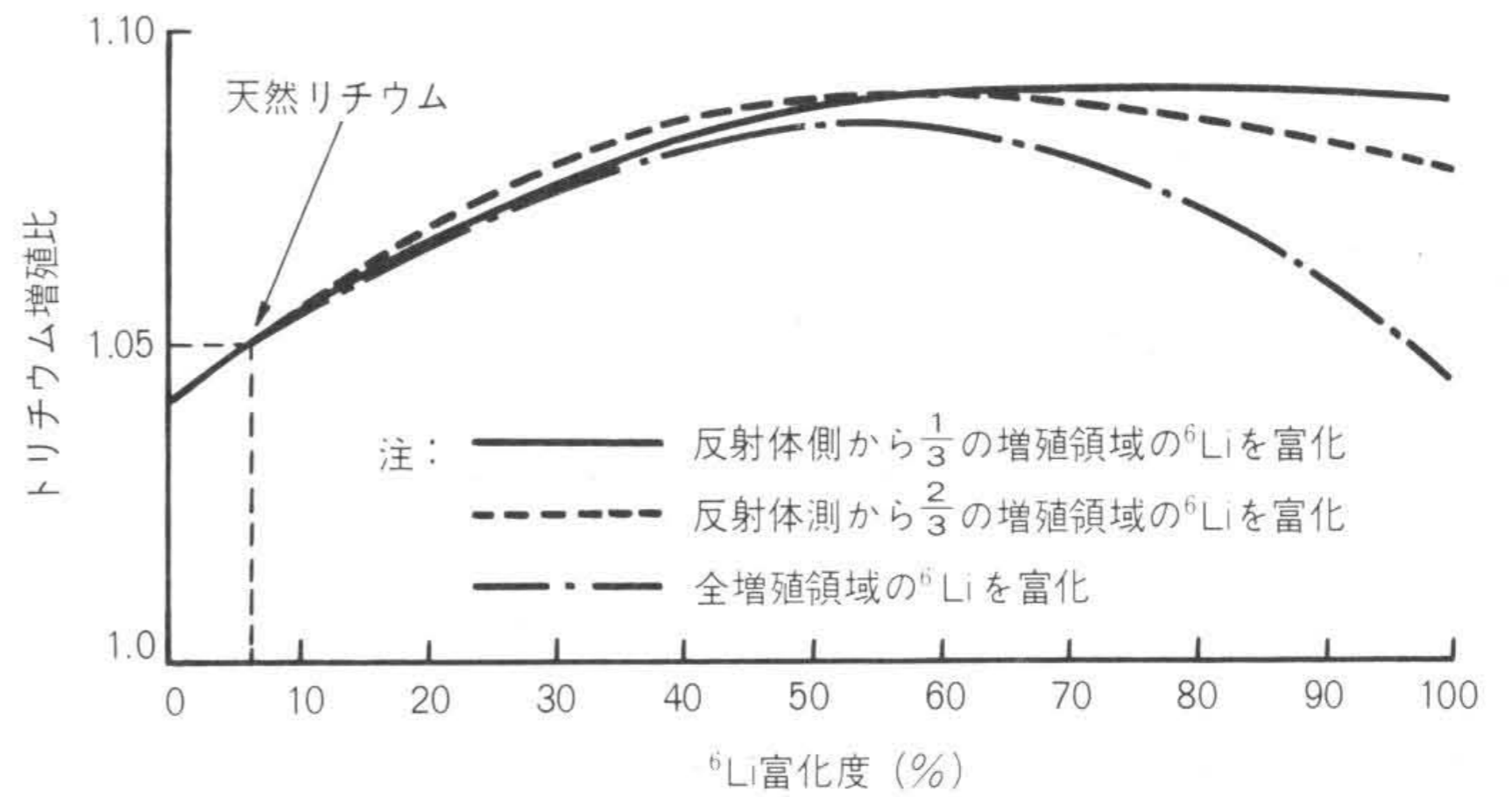


図8 ${}^6\text{Li}$ の富化度によるトリチウム増殖比の変化 ${}^6\text{Li}$ 富化度50%以下では各ケースとも同様に、50%を超えると、反射体側 $\frac{1}{3}$ の増殖領域を富化した場合は一定で、全増殖領域の場合は逆に増殖比が下がる。これは ${}^7\text{Li}$ の寄与が減るためである。

殖比を大幅に減少させるため不適である。

- (3) 第一壁冷却材としては、増殖比の点ではヘリウムガスが最も適している。しかし、除熱特性では水が適しており、特に増殖比の減少の小さい重水が優れている。軽水を用いる場合には、冷却チャンネルの実効的な厚さを減らす構造上の工夫が必要である。

- (4) Beは、中性子増倍材としては、高融点、高熱伝導率の特性をもち、熱的性能の面でも好ましい。第一壁と増倍層の間に薄い($\sim 1\text{cm}$)増殖層の設置により大きな増殖比が得られ、Pbよりも優れており、実用炉にも適用できる可能性が大きい。
- (5) トリチウム増殖材であるリチウムは、天然のまま用いるよりも、 ${}^6\text{Li}$ を50%に富化したほうがより高い増殖比が得られる。

以上の結果を踏まえて、軽水冷却、SUS構造材、Be増倍材、 ${}^6\text{Li}$ の50%富化を基本としたブランケットをもつ核融合実験炉の概念設計が進められている。

参考文献

- 1) Y. Iso, et al.: Fusion Reactor Design-III, Nucl. Fusion, 22, 185(1974)
- 2) C. C. Baker, et al.: STARFIRE-A Commercial Tokamak Fusion Power Plant Study, ANL/FPP-80-1, Argonne National Laboratory 10-118 (Sept. 1980)
- 3) International Tokamak Reactor Phase I, International Atomic Energy Agency, Vienna(1982)
- 4) K. Maki, et al.: Effect of Blanket Structure on Tritium Breeding Ratio in Fusion Reactors, Nucl. Technol./Fusion, 4, 468(1983)
- 5) 核融合炉作業委員会: 核融合炉へのアプローチと比較, 139 (1980)
- 6) M. Tobias, et al.: CONF740402-P2, San Diego Vol. III 185(1974)
- 7) 日本原研炉設計研究室, 核融合実験炉(FER)の概念設計(オプションA), JAERI-M83-213(1984年1月)
- 8) W. W. Ehgle, Jr.,: A User's Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering, K-1693, Computing Technology Center, Union Carbide Corporation (1967)
- 9) Y. Seki, et al.: Coupled 42-Group Neutron and 21-Group Gamma Ray Cross Section Sets for Fusion Reactor Calculations, JAERI-M8818(1980)