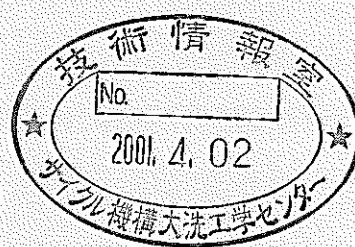


減速材を用いたLLFP消滅特性の整理 (研究報告)

2000年3月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

減速材を用いたLLFP消滅特性の整理 (研究報告)

大木繁夫*、青柳成美**

要 旨

FBR実用化戦略調査研究で検討対象となっている燃料形態及び冷却材の異なる高速炉について長半減期核分裂生成物 (Long-Lived Fission Product, LLFP) の消滅特性解析を行った。対象とした高速炉は、①ナトリウム冷却酸化物燃料炉心、②ナトリウム冷却窒化物燃料炉心 (Heボンド) 、③ナトリウム冷却窒化物燃料炉心 (Naボンド) 、④ナトリウム冷却金属燃料炉心、⑤鉛冷却窒化物燃料炉心 (BREST-300) 、⑥鉛冷却酸化物燃料炉心、⑦炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心 (ETGBR) である。LLFPとしては⁷⁹Se, ⁹³Zr, ⁹⁹Tc, ¹⁰⁷Pd, ¹²⁶Sn, ¹²⁹I, ¹³⁵Csの7核種を選定した。それらを減速材 ($ZrH_{1.7}$) 付きターゲット集合体に装填、上記高速炉の径方向ブランケット位置での照射を想定し、LLFP消滅量及び消滅率を算出した。主な結果を以下に示す。

- 径方向ブランケットにおける減速材ターゲットを用いたLLFP消滅特性には、炉心部の燃料形態及び燃料形態の違いはほとんど現れない。
- 大型炉よりも中型炉の方が炉心燃料集合体数に対するLLFPターゲット数が多いため、炉出力あたりのLLFP消滅量が大きくなる。

本報告書は実用化戦略調査研究WBS I-1-B②「多様な炉心概念の技術評価」に係る平成11年度の検討結果をまとめたものである。

* 大洗工学センター システム技術開発部 炉心技術開発グループ

** 株式会社 原子力システム (所属: 株式会社 アイ・エス・エー)

LLFP transmutation in various fast reactors using a moderating target

OHKI Shigeo*, AOYAGI Shigeyoshi**

Abstract

Transmutation property of long-lived fission product (LLFP) was analyzed for various fast reactor cores having different fuel and coolant types. The investigated fast reactor cores were ①sodium cooled and oxide fueled core, ②sodium cooled and nitride fueled core (He-bond), ③sodium cooled and nitride fueled core (Na-bond), ④sodium cooled and metal fueled core, ⑤lead cooled and nitride fueled core (BREST-300), ⑥lead cooled and oxide fueled core, and ⑦carbon dioxide gas cooled and oxide fueled core (ETGBR).

Selected seven LLFPs were ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I and ^{135}Cs . Taking them into moderating target subassemblies loaded on the radial blanket region, the transmutation amount and rate of LLFPs for each investigated core were evaluated and compared. Followings are the main results:

- LLFP transmutation property in a moderating target has little dependence on the fuel and coolant types of the fast reactor core.
- A middle-sized core has larger LLFP transmutation amount per reactor power than a large-sized core.

* Reactor Core Physics Group, System Technology Division, OEC, JNC

** ISA

目次

第1節 はじめに	1
第2節 対象炉心	1
第3節 LLFP装荷方法	2
第4節 計算項目	2
第5節 計算方法	3
第6節 計算結果及び考察	4
第7節 まとめ	5
参考文献	6

図リスト

図 1.1 ナトリウム冷却酸化物燃料炉心配置図（基準プラントレフアレンス炉心）	7
図 1.2 ナトリウム冷却窒化物燃料炉心配置図（He ボンド）	8
図 1.3 ナトリウム冷却窒化物燃料炉心配置図（Na ボンド）	9
図 1.4 ナトリウム冷却金属燃料炉心配置図	10
図 1.5 鉛冷却窒化物燃料炉心配置図	11
図 1.6 鉛冷却酸化物燃料炉心配置図	12
図 1.7 炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心配置図	13
図 2 LLFP ターゲットにおける中性子スペクトルの軟化（ナトリウム冷却酸化物燃料炉心）	14
図 3 燃焼チェーンモデル	15
図 4 LLFP ターゲットにおける中性子スペクトルの比較	16
図 5 LLFP の中性子捕獲反応断面積	17
図 6 LLFP による中性子捕獲反応エネルギー分布（ナトリウム冷却酸化物燃料炉心）	18
図 7.1 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（ナトリウム冷却酸化物燃料炉心）	19
図 7.2 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（ナトリウム冷却窒化物燃料炉心（He ボンド））	20
図 7.3 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（ナトリウム冷却窒化物燃料炉心（Na ボンド））	21
図 7.4 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（ナトリウム冷却金属燃料炉心）	22
図 7.5 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（鉛冷却窒化物燃料炉心）	23
図 7.6 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（鉛冷却酸化物燃料炉心）	24
図 7.7 LLFP 消滅率と必要ターゲット数の関係（炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心）	25
図 8.1 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（Se-79）	26
図 8.2 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（Zr-93）	27
図 8.3 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（Tc-99）	28
図 8.4 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（Pd-107）	29
図 8.5 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（Sn-126）	30
図 8.6 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（I-129(CeI ₃)）	31
図 8.7 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（I-129(NaI)）	32
図 8.8 LLFP 捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係（Cs-135）	33
図 9.1 LLFP ターゲット装荷による実効増倍率の変化（Tc-99）	34
図 9.2 LLFP ターゲット装荷による燃焼反応度の変化（Tc-99）	35
図 9.3 LLFP ターゲット装荷による増殖比の変化（Tc-99）	36

図 9.4 LLFP ターゲット装荷による最大線出力の変化(Tc-99) 37

表リスト

表 1 検討対象炉心の主な仕様	38
表 2 LLFP の化学形及び数密度	39
表 3 LLFP ターゲット集合体の仕様	40
表 4 エネルギー群構造	41
表 5.1 LLFP 消滅特性解析結果(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)	42
表 5.2 LLFP 消滅特性解析結果(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(He ボンド))	43
表 5.3 LLFP 消滅特性解析結果(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(Na ボンド))	44
表 5.4 LLFP 消滅特性解析結果(ナトリウム冷却金属燃料炉心)	45
表 5.5 LLFP 消滅特性解析結果(鉛冷却窒化物燃料炉心)	46
表 5.6 LLFP 消滅特性解析結果(鉛冷却酸化物燃料炉心)	47
表 5.7 LLFP 消滅特性解析結果(炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心)	48
表 6.1 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)	49
表 6.2 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(He ボンド))	50
表 6.3 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(Na ボンド))	51
表 6.4 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却金属燃料炉心)	52
表 6.5 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(鉛冷却窒化物燃料炉心)	53
表 6.6 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(鉛冷却酸化物燃料炉心)	54
表 6.7 LLFP ターゲット装荷による炉心特性への影響(炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心)	55

1. はじめに

FBR 実用化戦略調査研究における環境負荷低減の観点からの炉心概念絞り込みの一助とするために、同調査研究フェーズ1において検討対象となっている冷却材及び燃料形態の異なる種々の高速炉炉心概念について長半減期核分裂生成物（Long-Lived Fission Product, LLFP）の消滅特性解析を行い、高速炉の冷却材・燃料種別と LLFP 消滅特性の関係、LLFP ターゲット集合体装荷による炉心特性への影響を定量的に整理した。

2. 対象炉心

本検討の対象炉心として FBR 実用化戦略調査研究フェーズ1で検討されている以下の高速炉炉心概念^[1]を選定した：

- ① ナトリウム冷却酸化物燃料炉心（基準プラントレヴァレンス炉心）
- ② ナトリウム冷却窒化物燃料炉心（He ボンド）
- ③ ナトリウム冷却窒化物燃料炉心（Na ボンド）
- ④ ナトリウム冷却金属燃料炉心
- ⑤ 鉛冷却窒化物燃料炉心（BREST-300）
- ⑥ 鉛冷却酸化物燃料炉心
- ⑦ 炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心（ETGBR）

各炉心の炉心体系を図1.1～1.7に、主要炉心仕様を表1に示す。

本書では簡単のため、例えばナトリウム冷却酸化物燃料炉心を「Na-MOX 大型炉」と呼ぶ場合がある。略式名は次のように付けるものとする：

<冷却材>

- ・ナトリウム冷却 → Na
- ・鉛冷却 → Pb
- ・炭酸ガス冷却 → CO₂

<燃料形態>

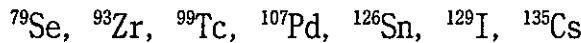
- ・酸化物燃料 → MOX
- ・窒化物燃料 → MN
- ・金属燃料 → Metal

<炉出力規模>

- ・原子炉熱出力 3800MW_{th}程度 → 大型炉
- ・原子炉熱出力 700MW_{th}程度 → 中型炉

3. LLFP 装荷方法

対象とする LLFP は次の 7 核種である：



これら LLFP の同位体を考慮した元素分離での消滅処理を考える方がより現実的であるが、本検討では消滅対象 LLFP 核種のみに着目、すなわち同位体分離を仮定した。

LLFP の化学形態は参考文献[4～8]より、照射試験等での製造実績の有無、化合物の融点あるいは化学的安定性等を勘案して実現性が高いと期待されるものを選択した。LLFP の化学形及び数密度を表 2 にまとめる。

LLFP は各対象炉心の径方向ブランケット位置にターゲット集合体により装荷するものとした。LLFP ターゲット集合体には LLFP ピンと減速材 ($\text{ZrH}_{1.7}$) ピンが含まれる。減速材ピンの装荷割合は、モンテカルロ計算コードを用いた ^{99}Tc 及び ^{129}I の消滅検討例^[2, 3]を参考とし、LLFP 消滅量及び消滅率がバランス良く大きくなる値として、LLFP ピン 20%、減速材ピン 80% に設定した。

LLFP ターゲット集合体の仕様は暫定的に対象炉心のブランケット仕様と同一とした(スミア密度を除く)。表 3 に LLFP ターゲット集合体の仕様をまとめた。LLFP ピン及び減速材ピンのスミア密度は暫定的に 70% TD とした。

なお、鉛冷却窒化物燃料炉心(BREST-300)には元々径方向ブランケットが存在しないため、炉心部と反射体部の間にターゲット装荷領域を一巻き設けることにした(図 1.5 参照)。ここで、ターゲット集合体の仕様は内側炉心燃料集合体と同一としている。

4. 計算項目

計算項目は LLFP の消滅特性に関する以下の量である：

- ・ ターゲットにおける LLFP 消滅量 (kg/cycle) 及び消滅率 (%/cycle)
- ・ 炉心部における LLFP 生成量 (kg/cycle)
- ・ 炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおける LLFP 消滅量 (kg/GW_{th}/year) 及び消滅率 (%/year)
- ・ LLFP ターゲット装荷による炉心特性の変化

計算上は 7 つの LLFP 核種を各々全ターゲットに装荷することを考え、LLFP 核種ごとに一炉心あたりの消滅特性を求めた。なお、異なる炉心間の比較のため、炉出力及びサイクル長さで規格化した消滅量（率）も示すことにした。

LLFP ターゲット装荷による炉心特性への変化としては、実効倍率、燃焼反応度、増殖比、最大線出力に着目した。今回の検討では Pu 富化度調整は行わなかった。

5. 計算方法

炉心燃焼計算は 2 次元 RZ 拡散理論にもとづいている。以下に計算方法を示す。

・炉定数 JENDL-3.2^[9]に基づく高速炉用 70 群定数セット (JFS-3-J3.2) 使用

・セル計算モデル 均質

・炉心計算モデル 2 次元 RZ 体系モデル

・炉心燃焼計算コード 拡散燃焼計算コード CITATION^[10] 使用

・エネルギー群数 18 群

減速材による大きな中性子スペクトルの軟化（図 2 参照）を扱うために、高速炉解析で用いられるエネルギー群構造をもとに、熱～熱外エネルギー領域にかけての群分割を考慮した。表 4 にエネルギー群構造を示す。

・燃焼チェーン 図 3 参照

7 つの LLFP の生成には「実効核分裂収率」を適用した。実効核分裂収率とは核分裂による FP 収率（一次核分裂収率）に、その後の崩壊や中性子照射による核変換による変化を取り入れた収率であり、中性子照射場における有限時間での累積核分裂収率である。ただし、LLFP 自身の中性子捕獲反応による核変換は別途燃焼チェーンで考慮されるため、実効核分裂収率にその分の変化は取り入れていない。本計算で使用した実効核分裂収率（図 3 中に値を示す）は、ORIGEN2 コードと付属の高速炉用ライブラリ^[11]より算出したものである。

減速材付きターゲット集合体における中性子束分布の計算においては、高速から熱エネルギーに渡る幅広いエネルギー領域、LLFP ターゲット集合体の非均

質効果、輸送効果、LLFP 核反応の空間及びエネルギー自己遮蔽効果を取り扱う必要がある。決定論に基づく計算コードによりこれらを扱う手法はまだ確立されておらず、これまで最確値を求める場合にはモンテカルロ計算コードが用いられてきた^[2, 3]。本検討では各炉心の LLFP 消滅特性を横並びで比較するのが目的であるため、計算手法として比較的粗い均質拡散近似を用いている。さらに、LLFP の炉定数には f-Table が備わっていないため、LLFP 核反応に対するエネルギー自己遮蔽効果は取り扱われていない。本計算結果を使用する場合には各炉心を相対的に比較するにとどめ、絶対値を最確値として用いることのないよう注意されたい。

6. 計算結果及び考察

(1) LLFP 消滅量及び消滅率の比較

LLFP 消滅特性解析結果を表 5.1～5.7 に示す。また、図 4 に各対象炉心の LLFP ターゲットにおける中性子スペクトルの比較を、図 5 に各 LLFP の中性子捕獲反応断面積を、図 6 に同反応の起こるエネルギー分布（断面積と規格化中性子束の積（Na-MOX 大型炉の場合の値））を示す。

表 5.1～5.7 の解析結果を LLFP 核種間及び炉心間で比較するために、LLFP 消滅率と必要ターゲット数との相関を図 7.1～7.7 にプロットした。ここで必要ターゲット数は全ターゲット数の何倍かで示しており、1 以下の場合、炉心で生成する LLFP を同じ炉心で消滅できるポテンシャルを有していることを意味する。これより、¹²⁶Sn 及び ¹³⁵Cs は炉心で生成した分を消滅できないこと、また ⁹³Zr についてもかなりの数のターゲットを使う必要があることがわかる。これは、¹²⁶Sn 及び ⁹³Zr については中性子捕獲反応断面積が他 LLFP 核種に比べ小さいこと（図 5、6 参照）、¹³⁵Cs については炉内生成量が大きいことが原因である。

図 7.1～7.7 を炉心間で比較すると、Na-MOX 大型炉、Na-MN 大型炉、Na-Metal 大型炉、CO₂-MOX 大型炉はほぼ同等の結果となっていることがわかる。これらに比べ、Pb-MN 中型炉（BREST-300）では消滅率の増加及び必要ターゲット数の増加が、Pb-MOX 中型炉では消滅率はあまり変わらないが、必要ターゲット数の減少が見られる。Pb-MN 中型炉では、今回設定したターゲット体数が少なかったことが、必要ターゲット数増加の主な原因となっている。また後で見るように同炉の高い消滅率はターゲットにおける中性子束レベルの高さに起因している。Pb-MOX 炉において必要ターゲット数が減少したのは同炉心が中型であり、大型炉に比べ炉心燃料に対するターゲットの数が多いからである。

LLFP 消滅率は Na-MOX 大型炉、Na-MN 大型炉、Na-Metal 大型炉、Pb-MOX 中型炉、CO₂-MOX 大型炉ではほぼ同等、Pb-MN 中型炉が大きくなる結果が得られたが、

次にその要因について調べることにする。LLFP 消滅率を決めるのは、中性子スペクトル（あるいは LLFP 一群捕獲反応断面積）並びにターゲットにおける中性子束レベルである。中性子スペクトルについては、図 4 に示すように減速材により大きく軟化されるため、炉心部で見られた燃料形態や冷却材による中性子スペクトルの違いはほとんど現れない。ただし、CO₂-MOX 大型炉は中性子漏洩が大きいことから、ターゲットでの中性子スペクトルはやや硬くなる。また、Pb-MN 中型炉 (BREST-300) では主に LLFP ターゲット装荷体数が少ないとため、さらに硬い中性子スペクトルとなっている。

次に中性子束レベルの比較を行う。図 8.1~8.8 に LLFP 消滅率と一群捕獲反応断面積及び中性子束レベルとの関係をプロットしたものを示す。Na-MOX 大型炉、Na-MN 大型炉、Na-Metal 大型炉、Pb-MOX 中型炉、CO₂-MOX 大型炉については、一群捕獲反応断面積及び中性子束レベルともほぼ同等であると言える。CO₂-MOX 大型炉、Pb-MN 中型炉では中性子スペクトルの硬さに応じ、一群捕獲反応断面積が小さくなっている。中性子束レベルに大きな相違の見られたのは Pb-MN 中型炉であり、中性子束レベルが他に比べ高いため消滅率が大きくなっている。

(2) 炉心特性への影響の比較

LLFP ターゲット装荷による炉心特性の変化を表 6.1~6.7 にまとめる。また、図 9.1~9.4 に炉心特性の変化について各炉心を比較したものを示す。ターゲット装荷により、実効増倍率の減少、増殖比の減少、最大線出力の増加が生じている。これらの LLFP 核種依存性は小さい。なお、燃焼反応度に関しては、MOX 燃料炉心の場合は増加、窒化物燃料及び金属燃料炉心の場合は減少する傾向となっている。これは本計算では Pu 富化度調整を行っていないため、内部転換が進んだ結果と考えられる。全体的に Pb-MOX 中型炉に対するインパクトが大きいようである。なお、Pb-MN 中型炉 (BREST-300) は元々径方向ブランケットがなかったため、増殖比に与える影響は小さくなっている。

7. まとめ

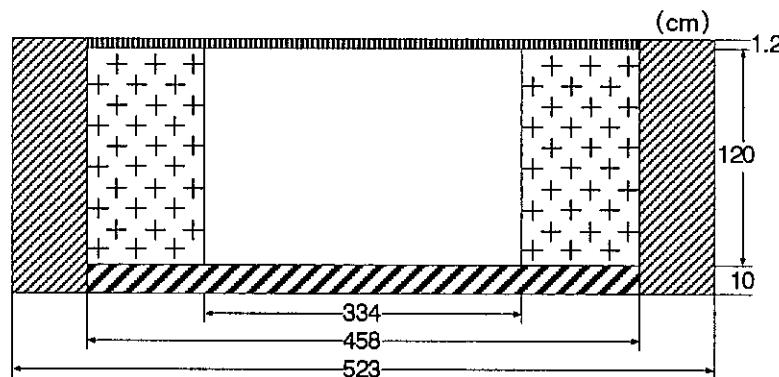
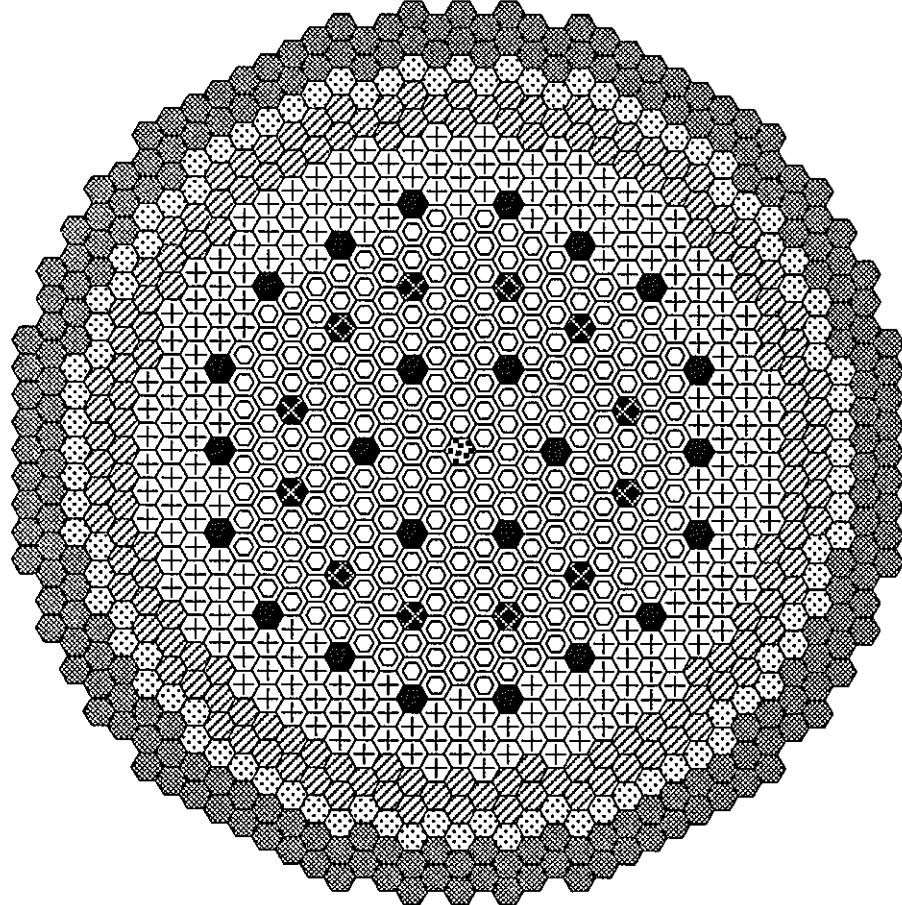
本解析により得られた高速炉の冷却材及び燃料種別と LLFP 消滅特性の関係を以下にまとめる：

- 径方向ブランケット領域における減速材ターゲットを用いた LLFP 消滅特性には、炉心部の燃料形態及び冷却材の違いはほとんど現れない。
- 大型炉よりも中型炉の方が炉心燃料集合体数に対する LLFP ターゲット数が

多いため、炉出力あたりの LLFP 消滅量が大きくなる。

参考文献

- [1] 早船浩樹, 他, “実用化戦略調査研究 (FBR プラント) 一平成 10 年度予備調査結果要約の取りまとめ”, *JNC TN9420 99-004* (1999).
- [2] 日向野直美, 若林利男, “高速炉による長半減期核分裂生成物の消滅特性の検討”, *PNC TN9410 96-248* (1996).
- [3] T. Wakabayashi and N. Higano, “Study on MA and FP Transmutation in Fast Reactor”, *Progress in Nuclear Energy*, Vol.32, No.3/4, p.555 (1998).
- [4] R. J. M. Konings, et al., “Technological Aspects of Transmutation of Technetium and Iodine”, *Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems: Emerging Fuel Cycles and Waste Disposal Options (Global' 93)*, Vol.1, p.1260 (1993).
- [5] R. J. M. Konings, et al., “Irradiation Tests of Transmutation of the Fission Products Technetium and Iodine”, *Proc. Int. Conf. on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems (Global' 95)*, Vol.2, p.1631 (1995).
- [6] 原子力活性化委員会 第1ワーキンググループ SCNES 開発シナリオ検討タスクフォース, “整合性のある原子力システムの開発シナリオ 平成 10 年度検討結果”, (1999).
- [7] A. Conti, et al., “Long-Lived Fission Product Transmutation Studies”, *Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems (Global' 99)*, (1999).
- [8] J. A. Dean (editor), “Lange’s Handbook of Chemistry (twelfth edition)”, McGraw-Hill (1979).
- [9] T. Nakagawa, et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**, 1259 (1995).
- [10] T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Cunningham, “Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION”, *ORNL-TM-2496*, Rev. 2 (1970).
- [11] A. G. Croff, “A User’s Manual for the ORIGEN2 Computer Code”, *ORNL-TM-7175* (1980).



□	内側炉心	▨	F P 集合体
✚	外側炉心	▨	軸方向ブランケット
▨	インシレータペレット		

◎ 内側炉心燃料集合体 (SASS付)	246体
⊕ 外側炉心燃料集合体	216体
▨ F P 集合体	150体
● SUS遮蔽体	96体
● B ₄ C遮蔽体	210体
● 主炉停止系制御棒1	24体
● 主炉停止系制御棒2	12体
● SUS集合体	1体
合 計	955体

図 1.1 ナトリウム冷却酸化物燃料炉心配置図（基準プラントレファレンス炉心）

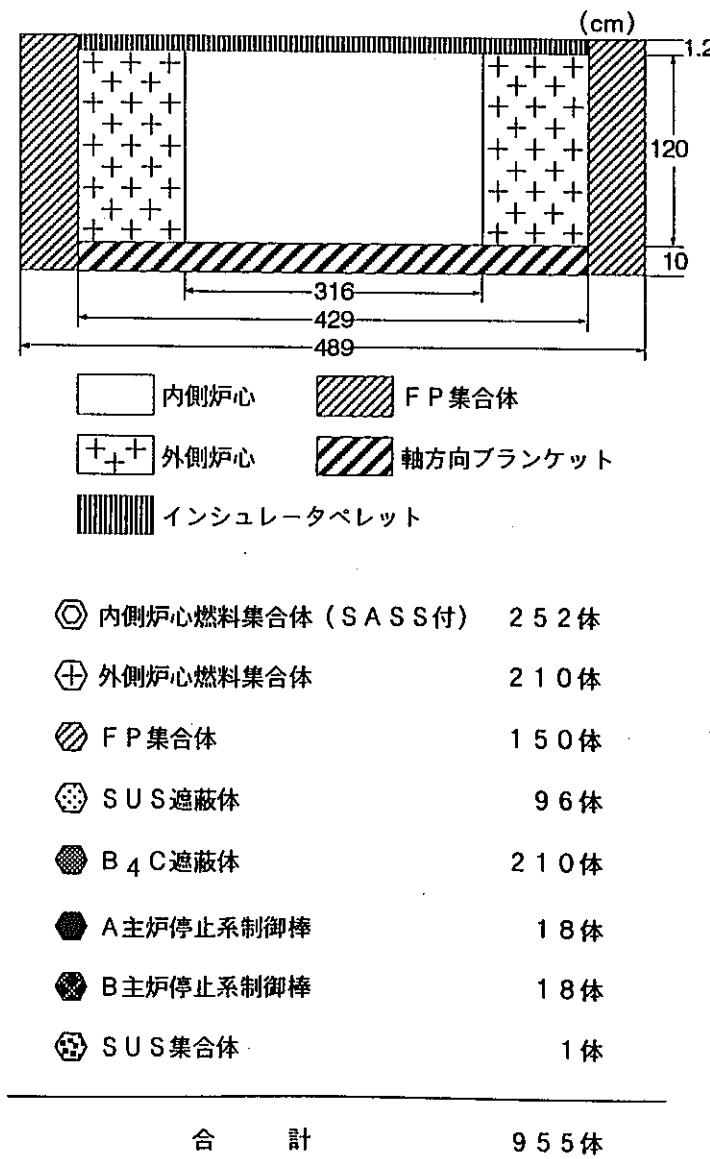
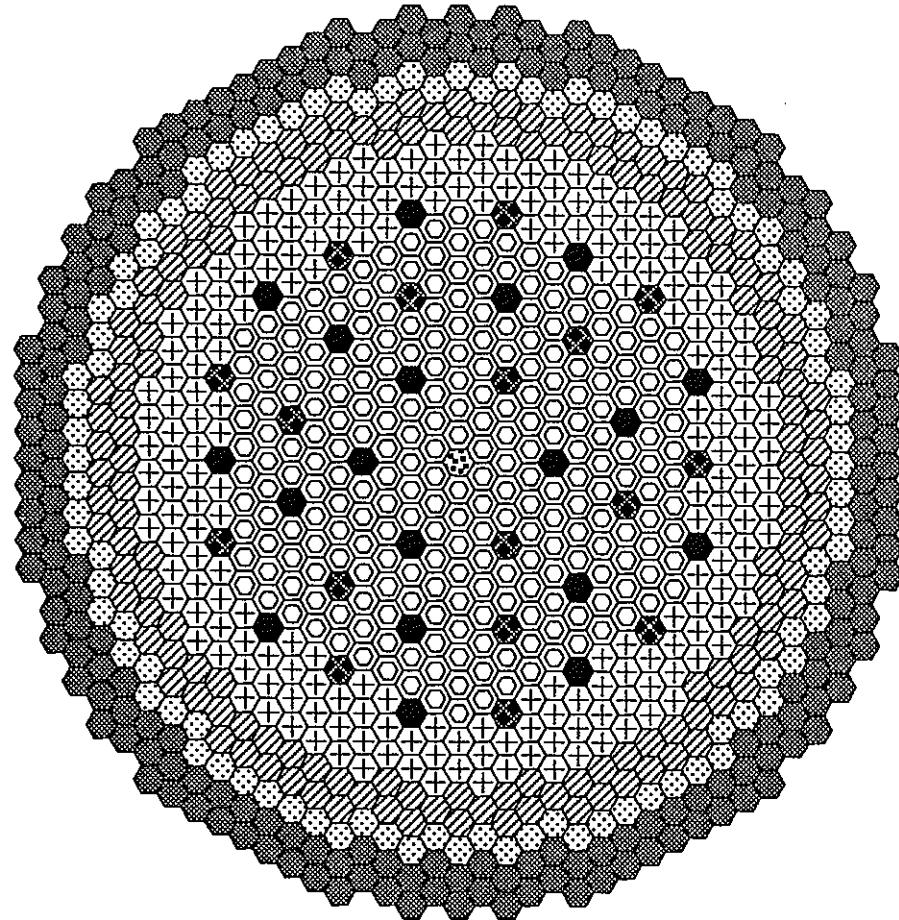
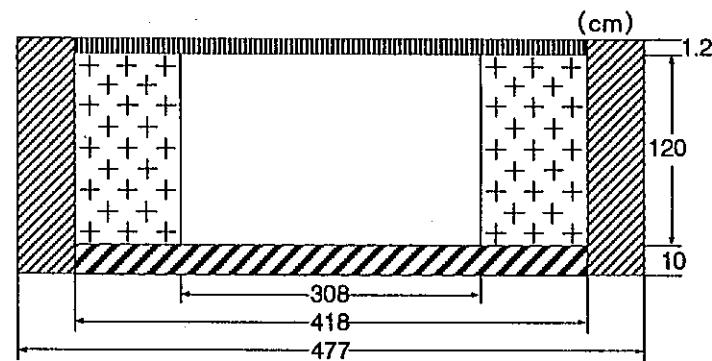
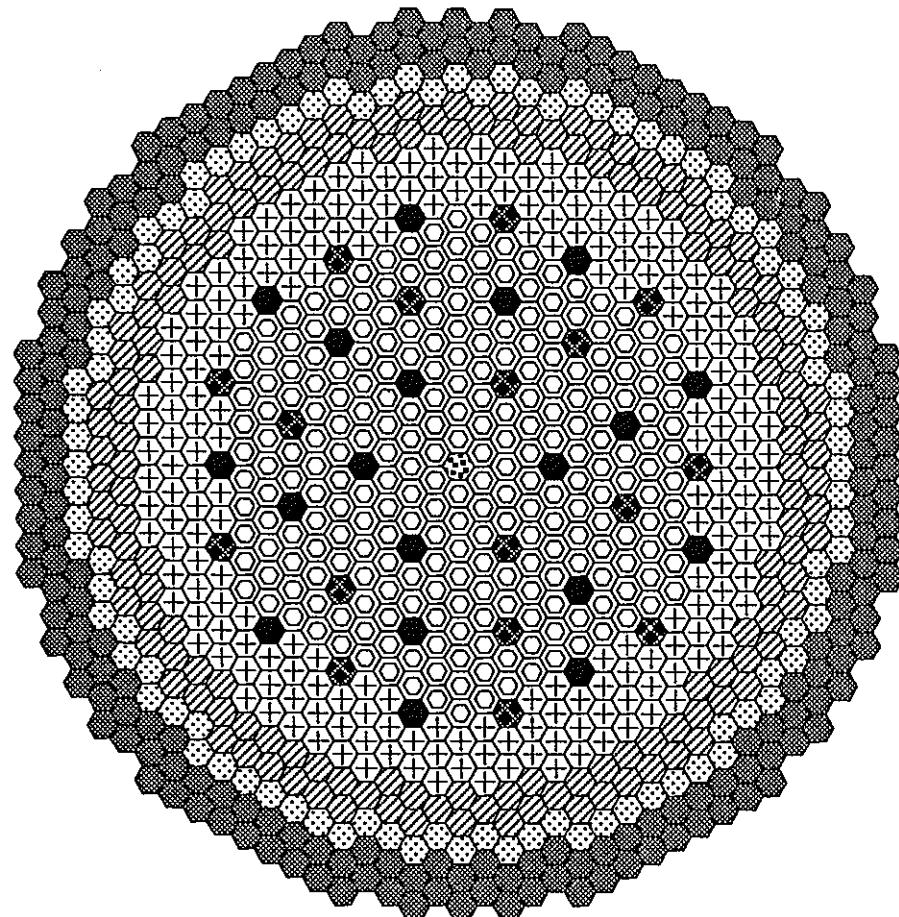


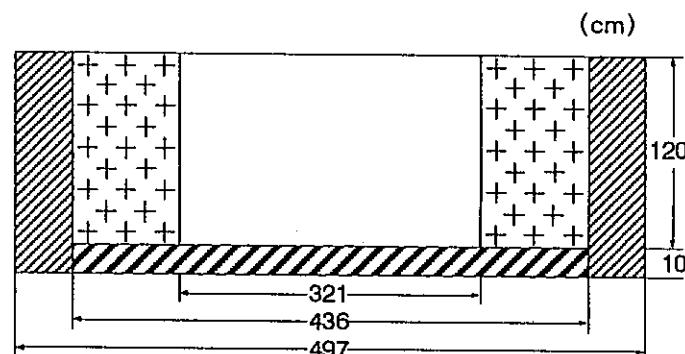
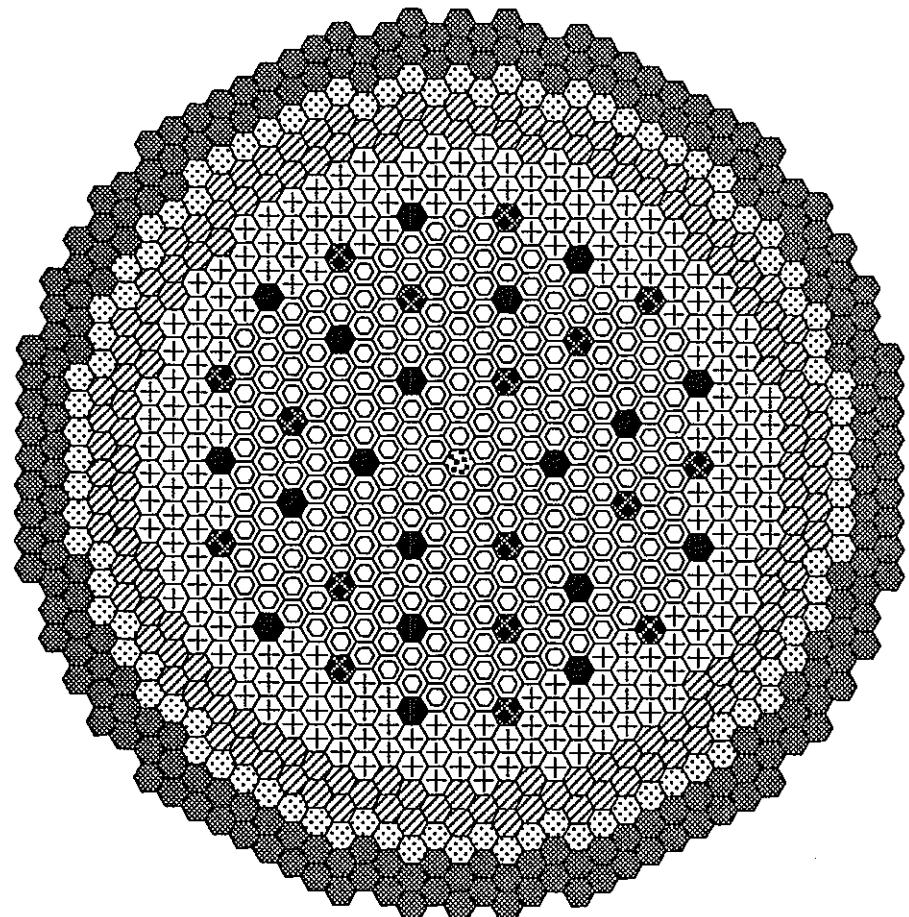
図1.2 ナトリウム冷却窒化物燃料炉心配置図 (Heボンド)



	内側炉心		FP集合体
	外側炉心		軸方向ブランケット
	インシュレータペレット		

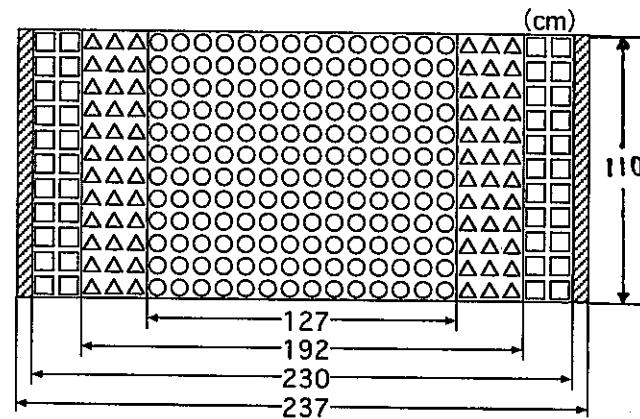
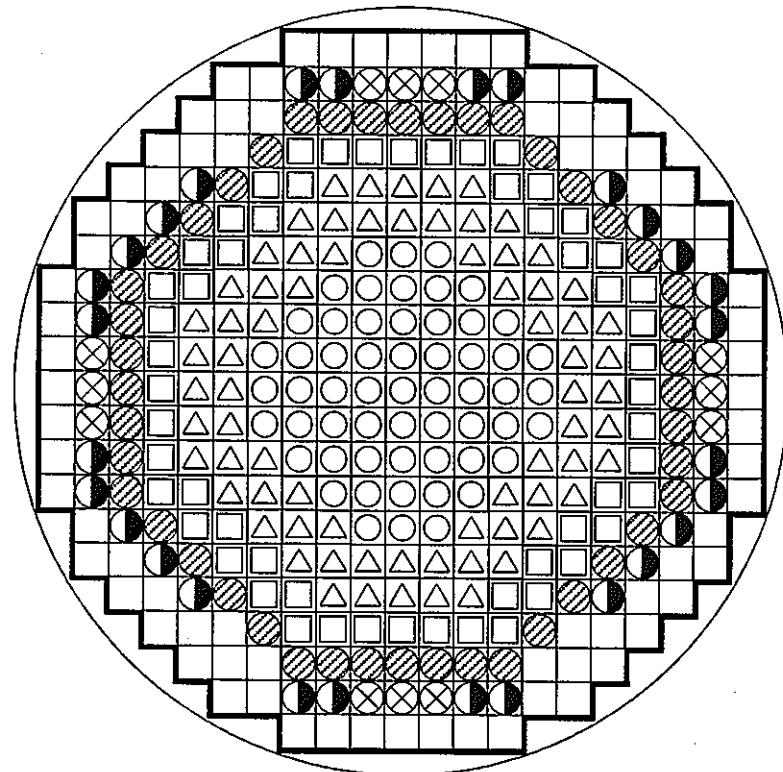
	内側炉心燃料集合体 (SASS付)	252 体
	外側炉心燃料集合体	210 体
	FP集合体	150 体
	SUS遮蔽体	96 体
	B ₄ C遮蔽体	210 体
	A主炉停止系制御棒	18 体
	B主炉停止系制御棒	18 体
	SUS集合体	1 体
<hr/>		
合 計		955 体

図1.3 ナトリウム冷却窒化物燃料炉心配置図 (Naボンド)



◎ 内側炉心燃料集合体 (SASS付)	252 体
⊕ 外側炉心燃料集合体	210 体
▨ FP集合体	150 体
● SUS遮蔽体	96 体
◆ B ₄ C遮蔽体	210 体
● A主炉停止系制御棒	18 体
◆ B主炉停止系制御棒	18 体
▢ SUS集合体	1 体
合 计	955 体

図 1.4 ナトリウム冷却金属燃料炉心配置図



○ 内側炉心燃料集合体 □ 外側炉心燃料集合体

△ 中側炉心燃料集合体 △ F P 集合体

○ 内側炉心燃料集合体 5 7 体

△ 中側炉心燃料集合体 7 2 体

□ 外側炉心燃料集合体 5 6 体

△ F P 集合体 4 4 体

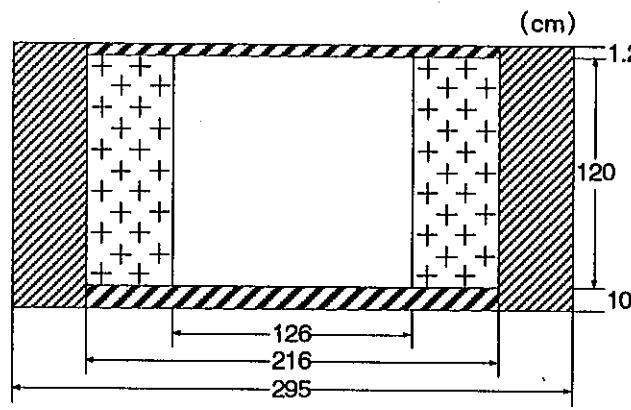
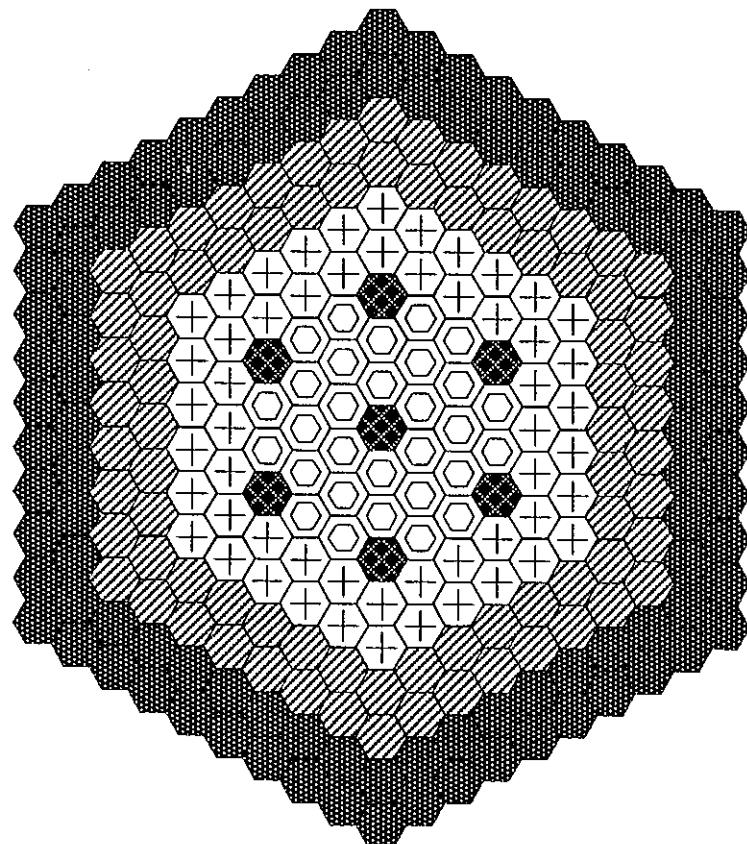
○ 鉛調整棒 1 2 体

○ タンクステンボライド吸収棒 2 8 体

□ 鉛反射体 1 2 4 体

合 計 3 9 3 体

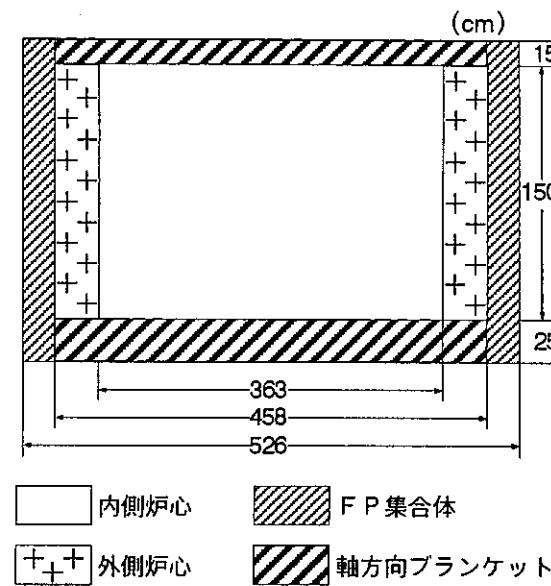
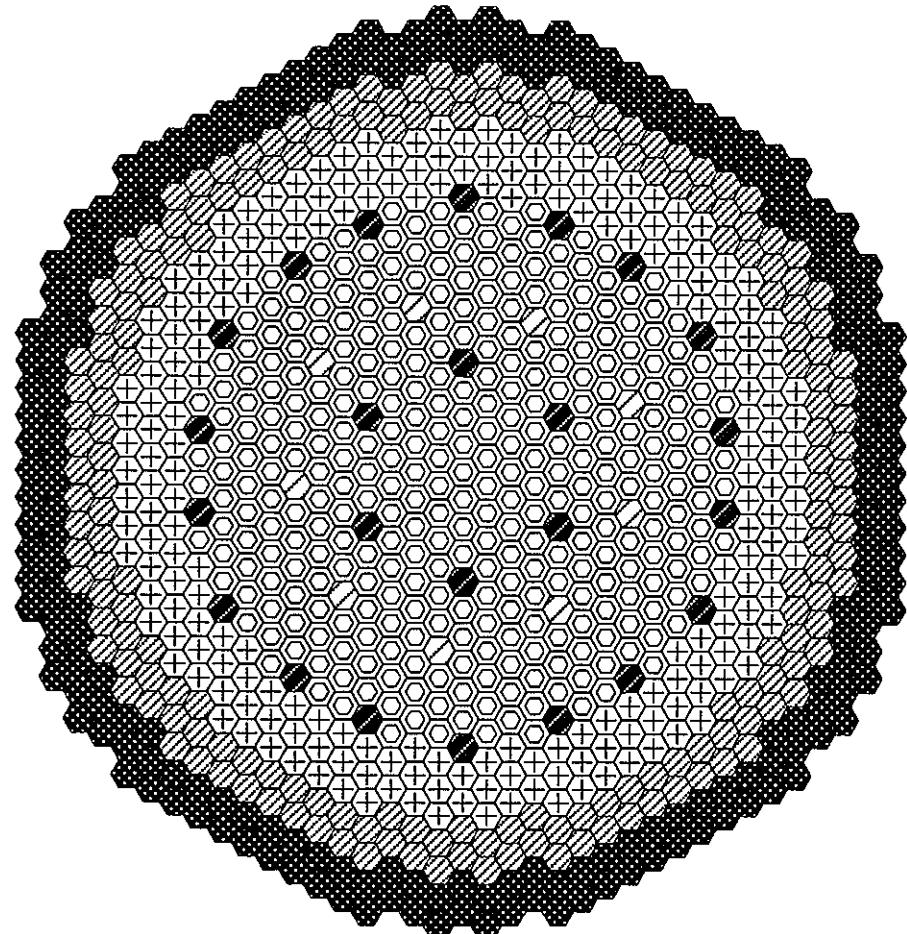
図 1.5 鉛冷却窒化物燃料炉心配置図



	内側炉心		FP集合体
	外側炉心		軸方向ブランケット

	内側炉心燃料集合体	30体
	外側炉心燃料集合体	54体
	FP集合体	78体
	鉛遮蔽体	102体
	制御棒	7体
<hr/>		
合 計		955体

図 1.6 鉛冷却酸化物燃料炉心配置図



◎ 内側炉心燃料集合体	334 体
⊕ 外側炉心燃料集合体	216 体
▨ F P 集合体	186 体
● 径方向リフレクタ	210 体
◆ C S D	24 体
▢ D S D	9 体
合 計	979 体

図 1.7 炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心配置図

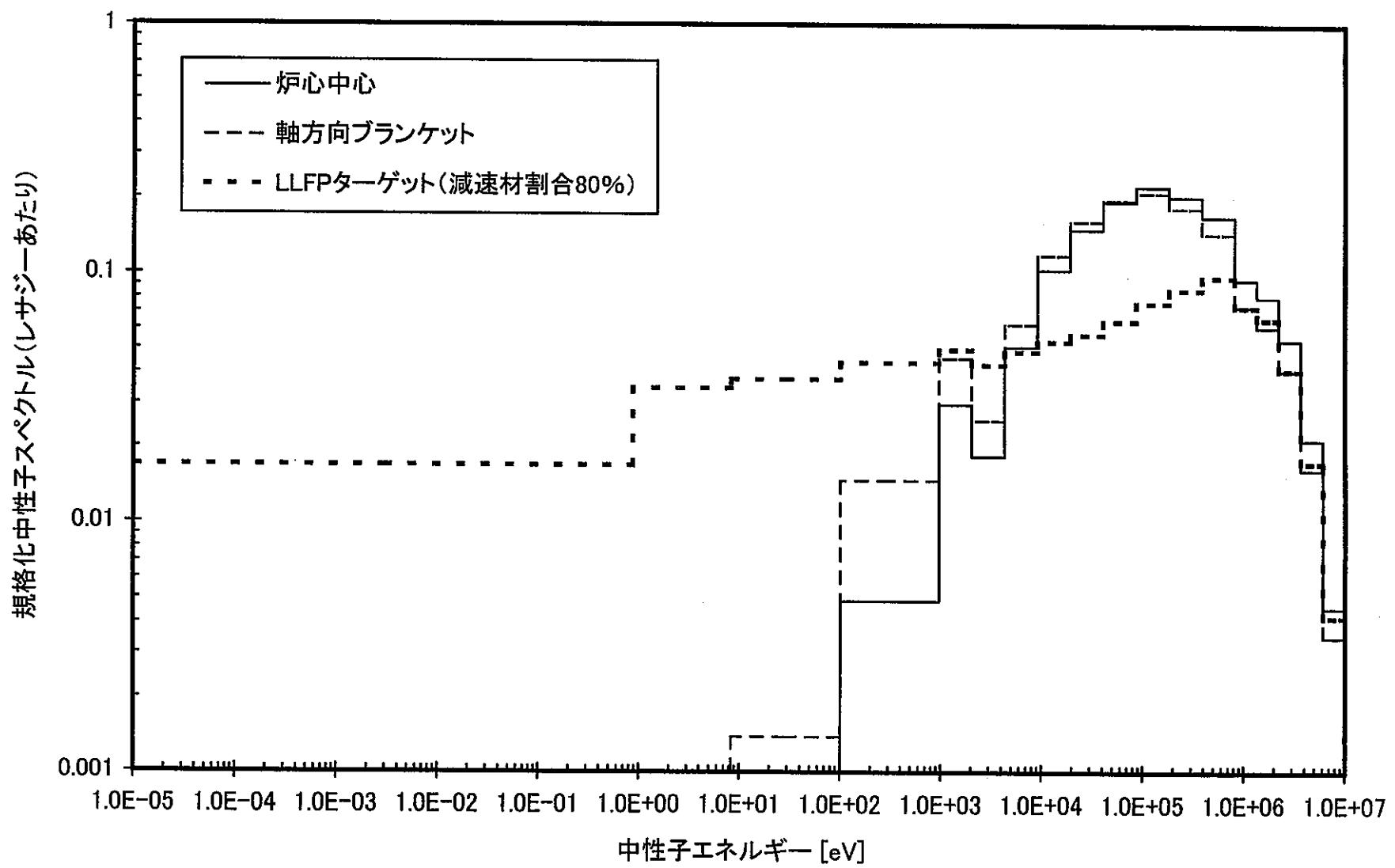
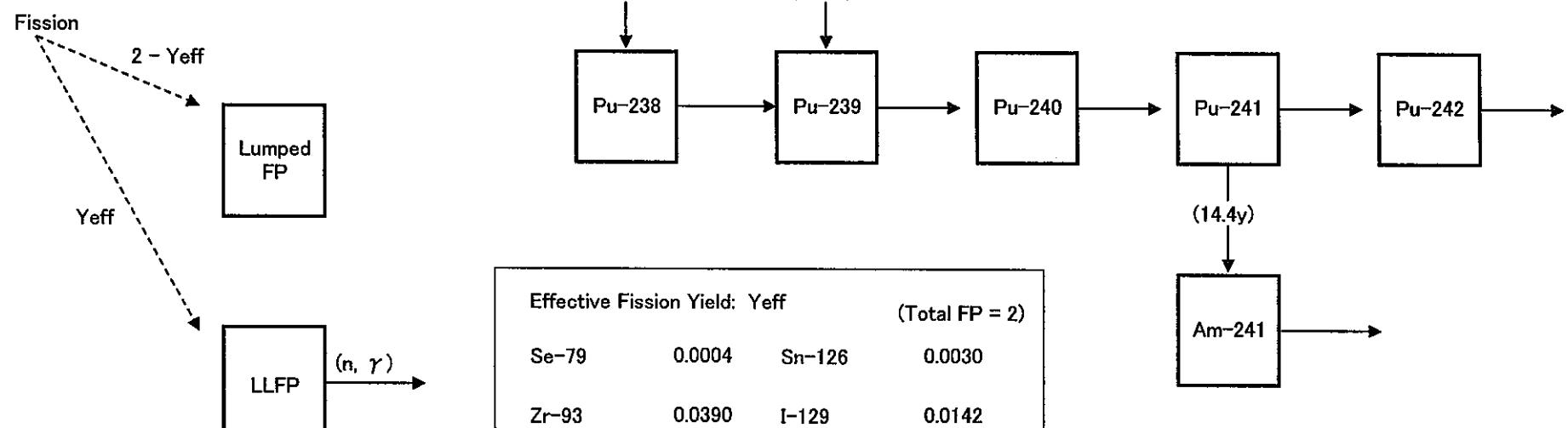


図2 LLFPターゲットにおける中性子スペクトルの軟化(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)



Effective Fission Yield: Y_{eff}			
(Total FP = 2)			
Se-79	0.0004	Sn-126	0.0030
Zr-93	0.0390	I-129	0.0142
Tc-99	0.0590	Cs-135	0.0718
Pd-107	0.0308	LLFP Total	0.2182

図3 燃焼チェーンモデル

規格化中性子束(単位レサジーあたり)

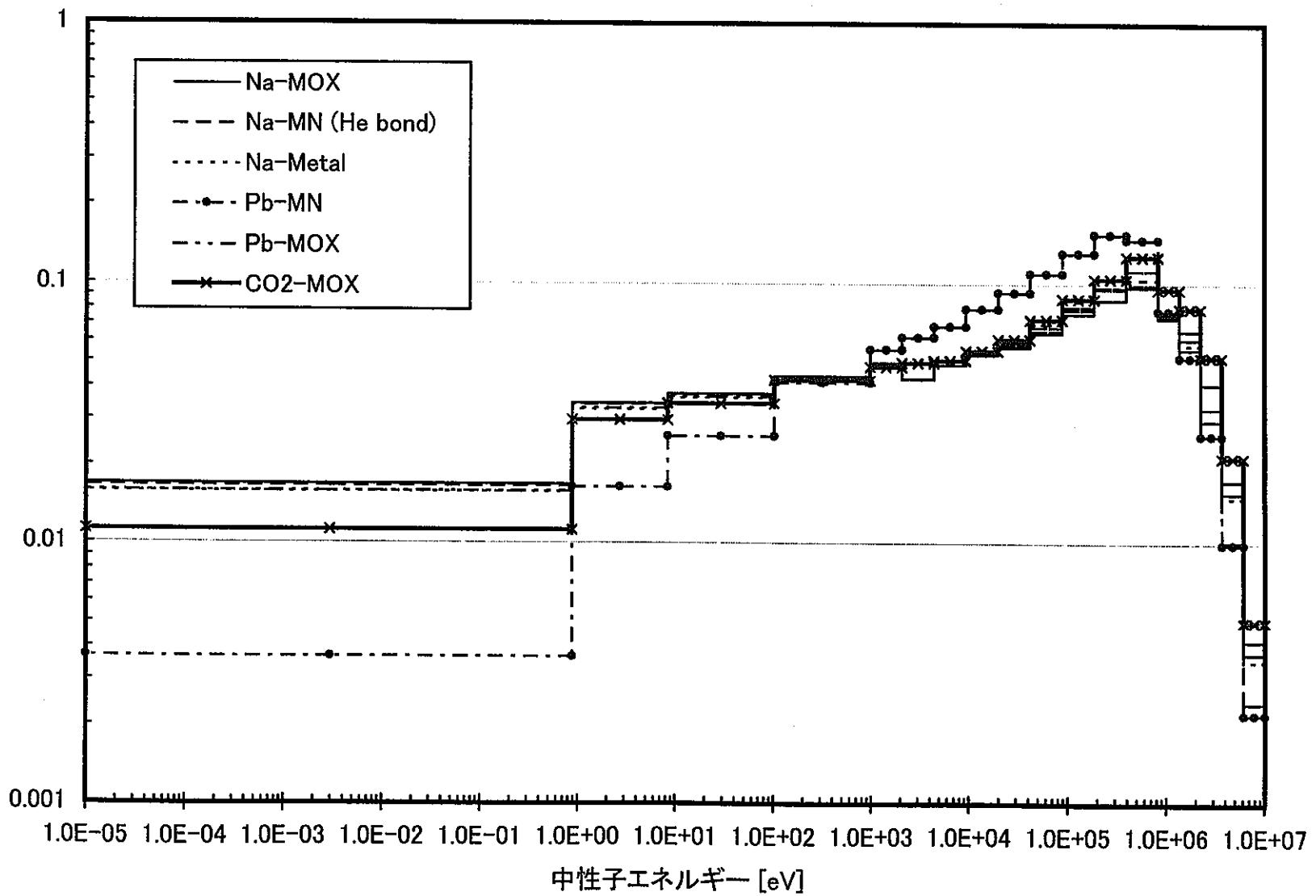


図4 LLFPターゲットにおける中性子スペクトルの比較

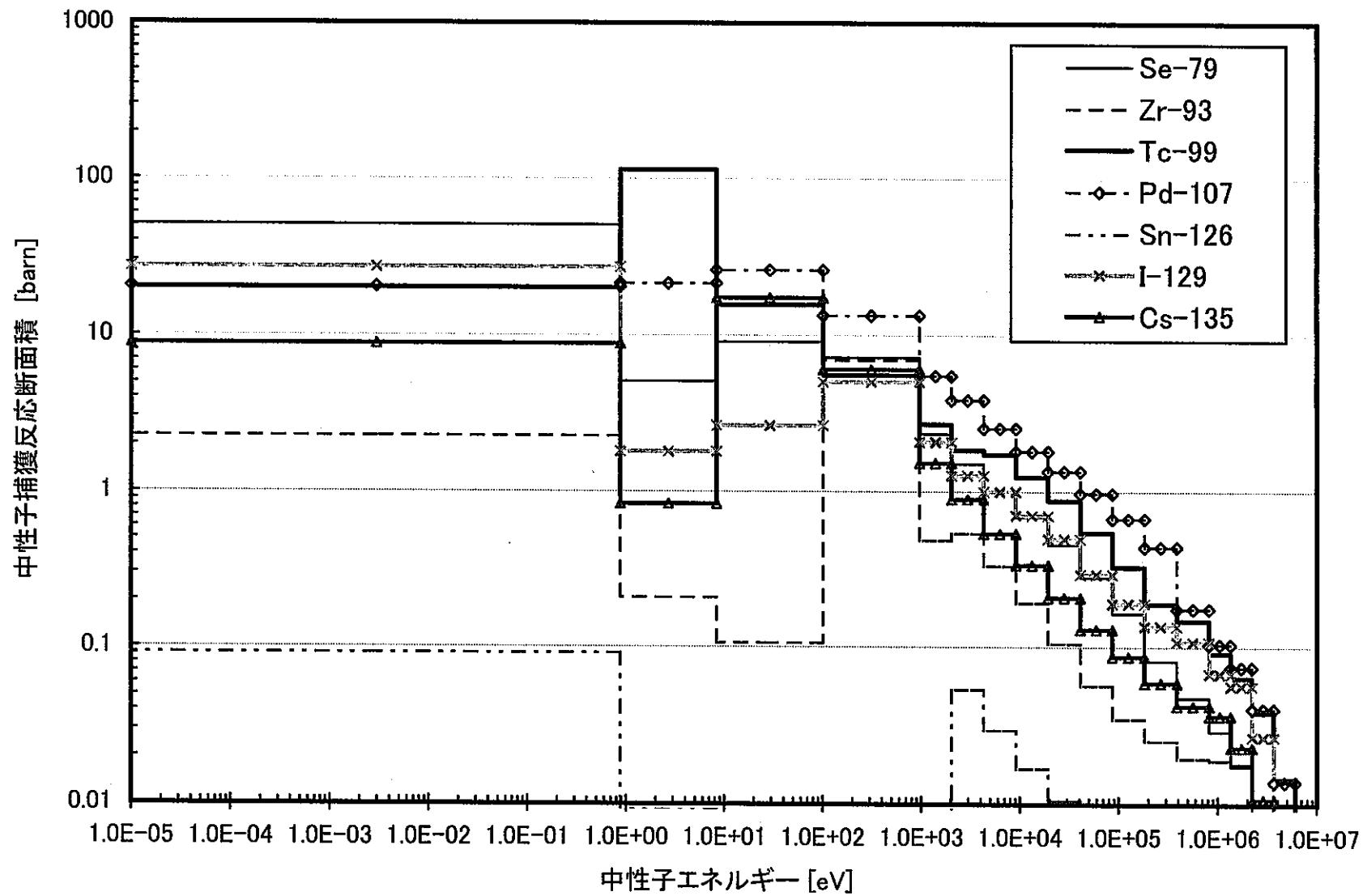


図5 LLFPの中性子捕獲反応断面積

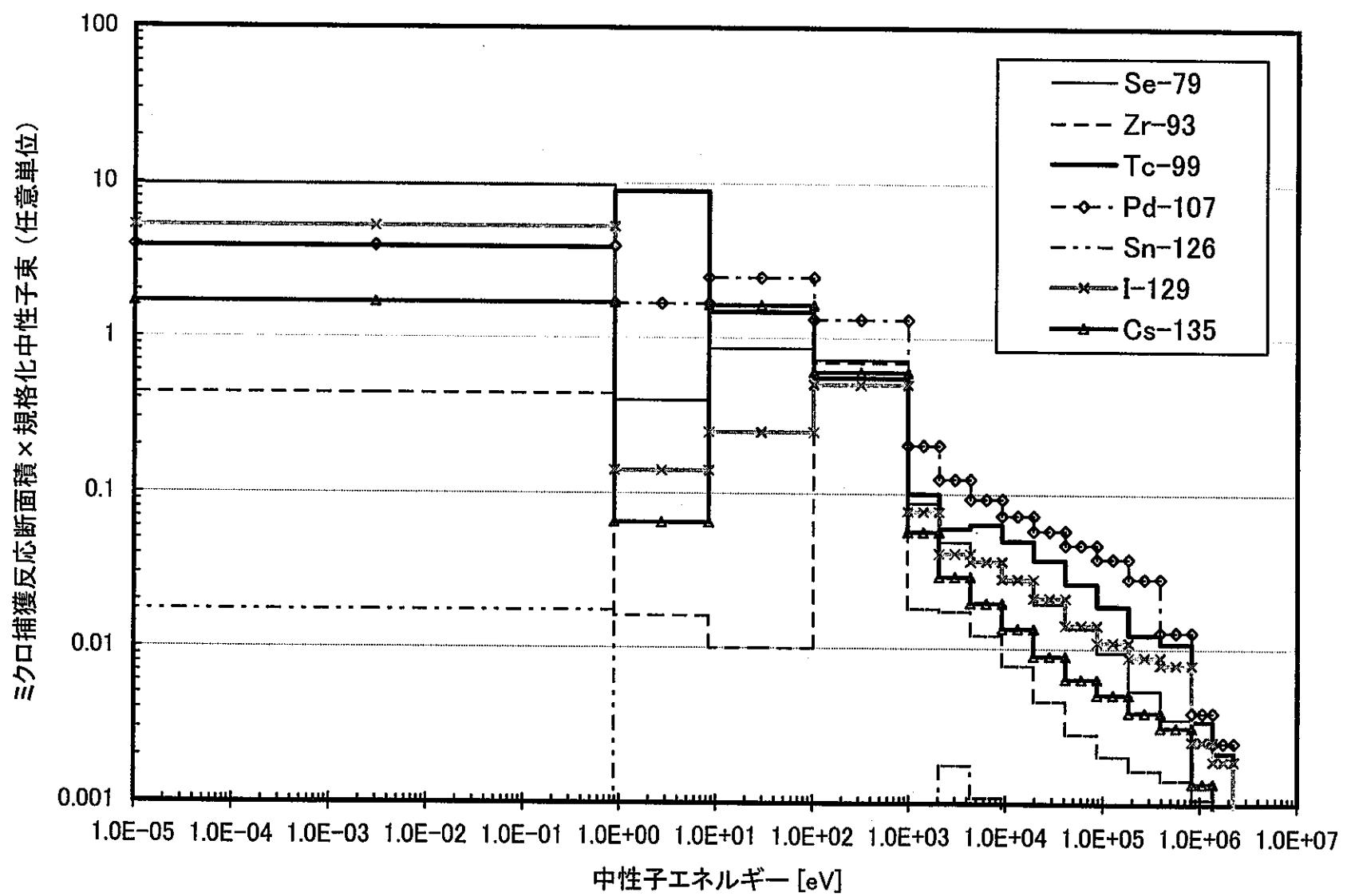


図6 LLFPによる中性子捕獲反応エネルギー分布(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)

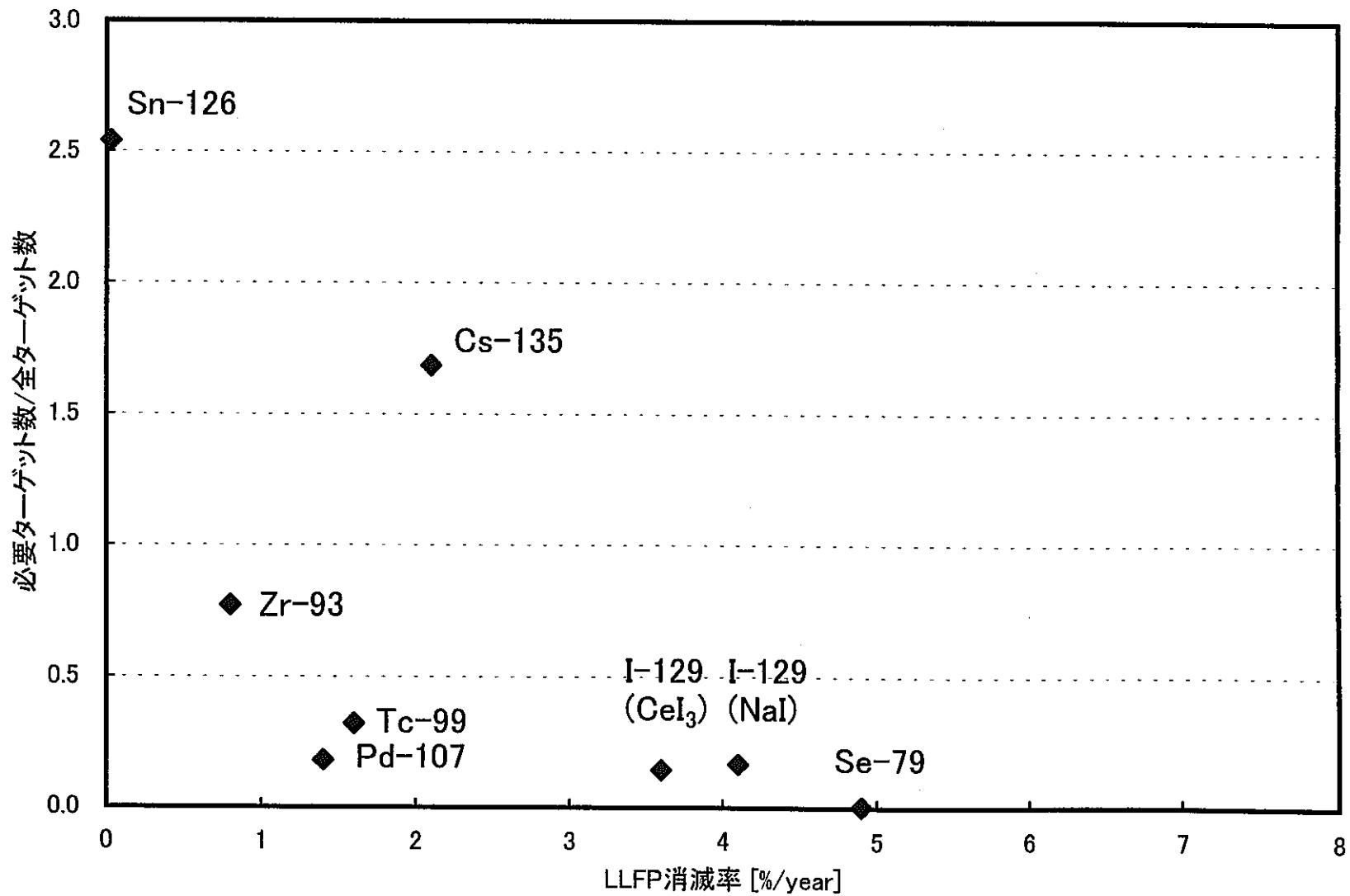


図7.1 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)

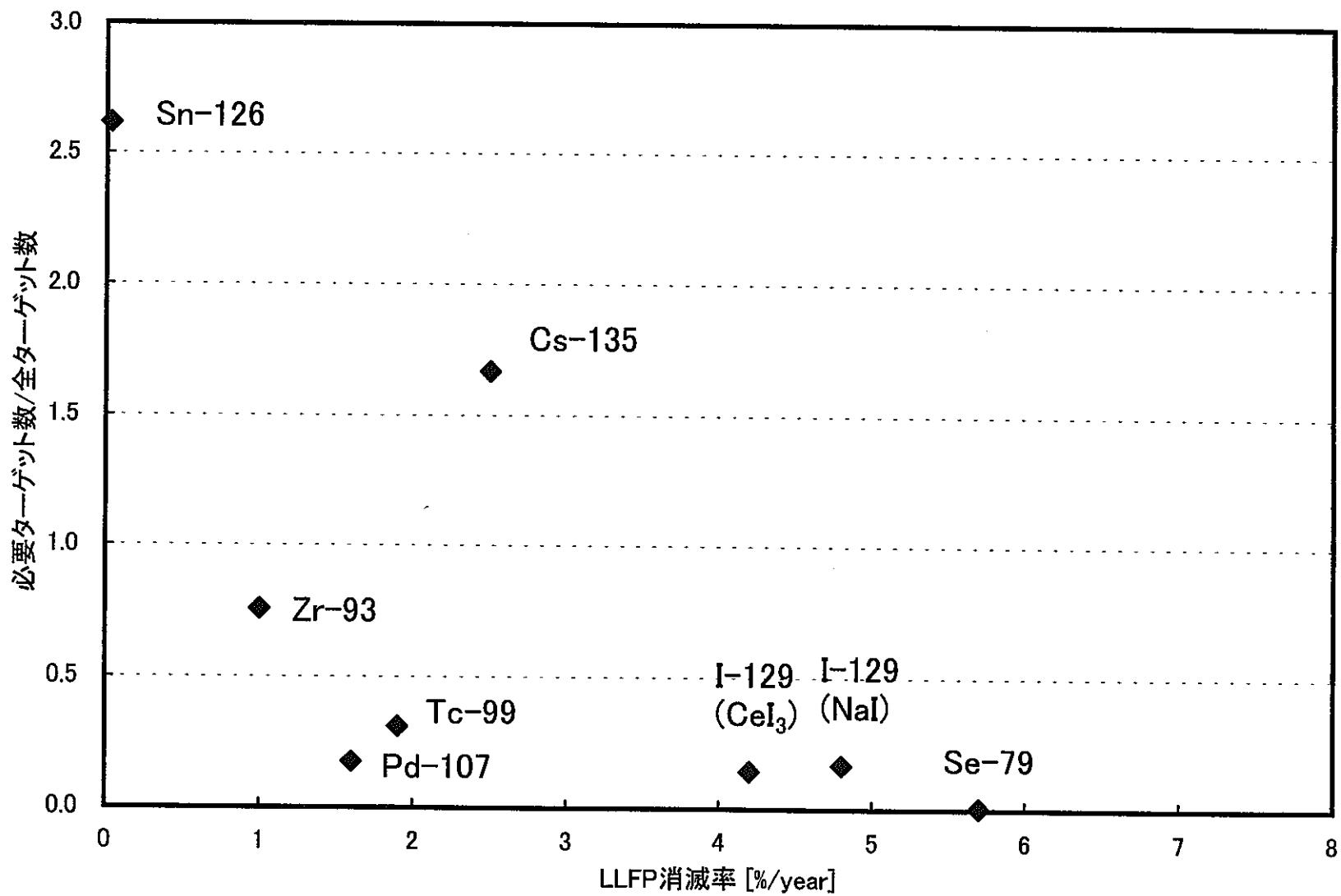


図7.2 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(Heボンド))

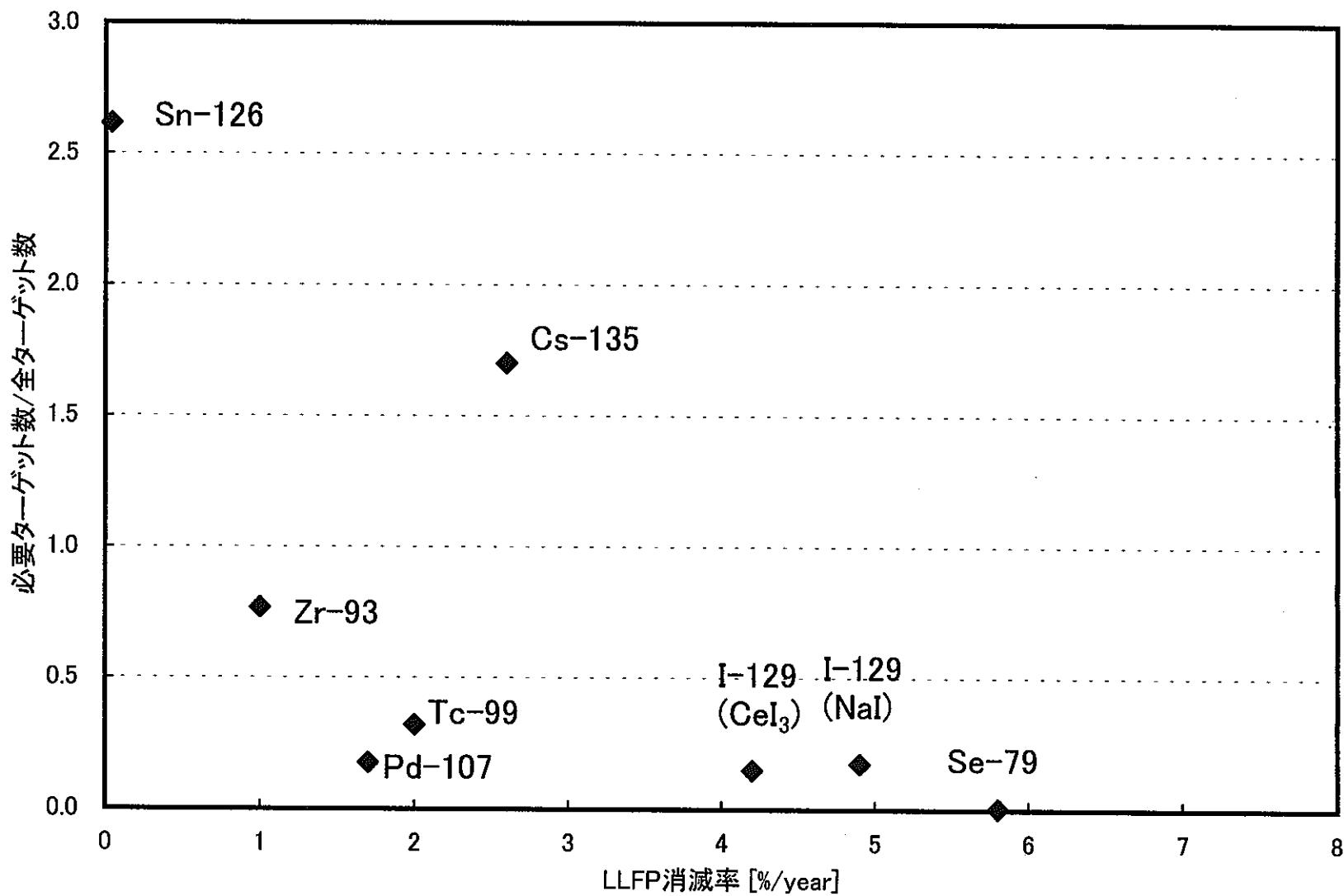


図7.3 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(ナトリウム冷却塗化物燃料炉心(Naボンド))

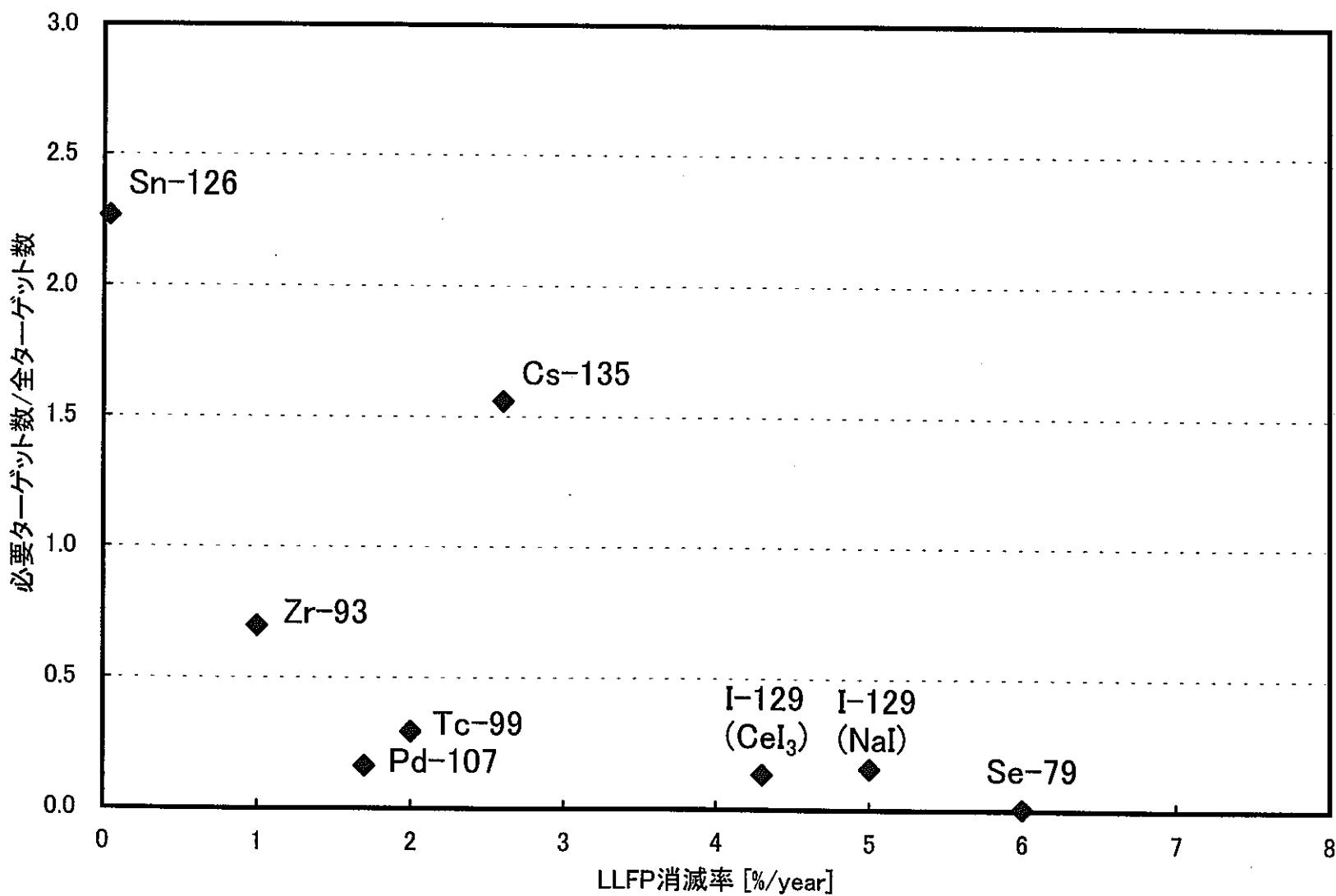


図7.4 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(ナトリウム冷却金属燃料炉心)

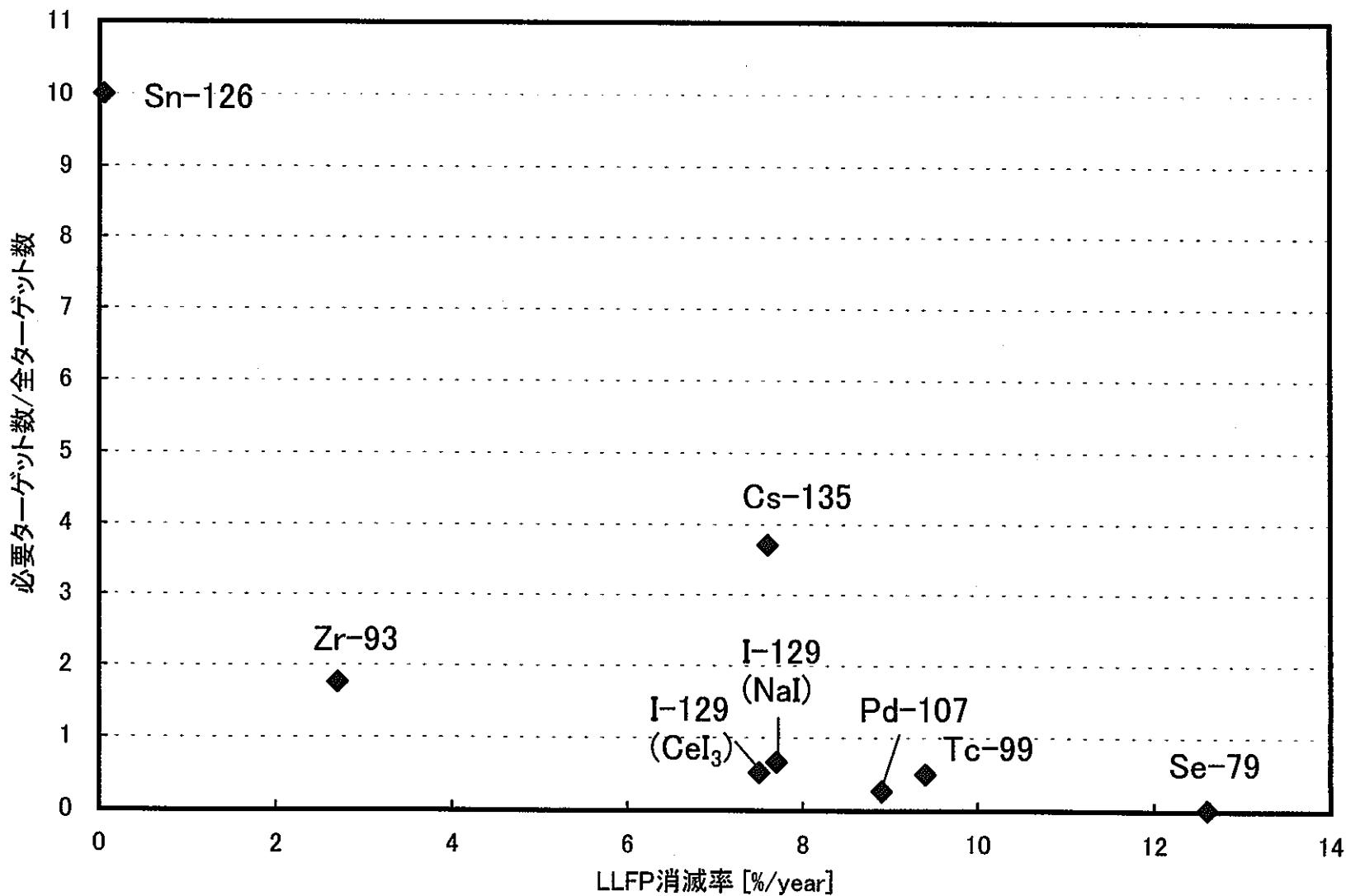


図7.5 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(鉛冷却窒化物燃料炉心)

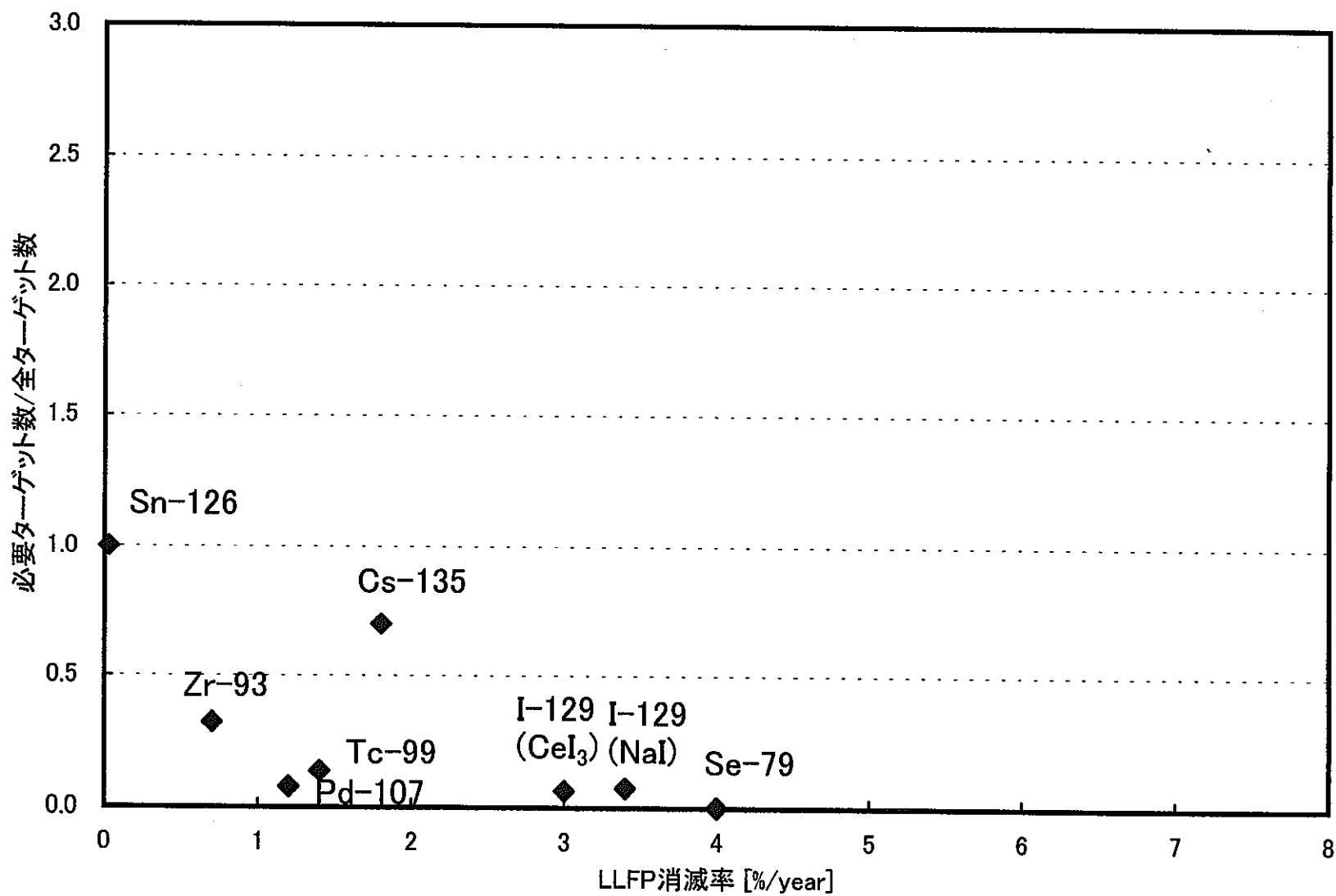


図7.6 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(鉛冷却酸化物燃料炉心)

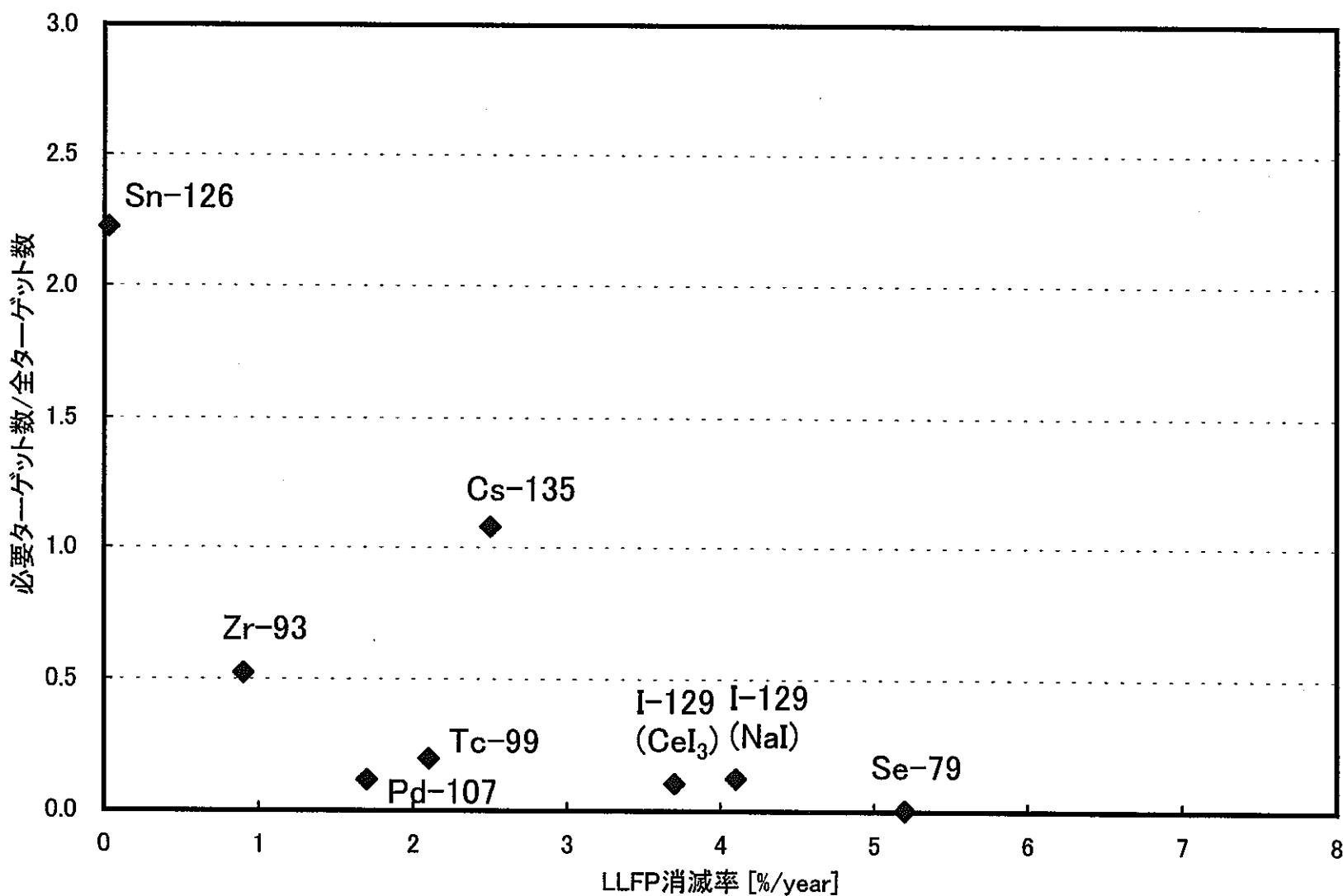


図7.7 LLFP消滅率と必要ターゲット数の関係(炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心)

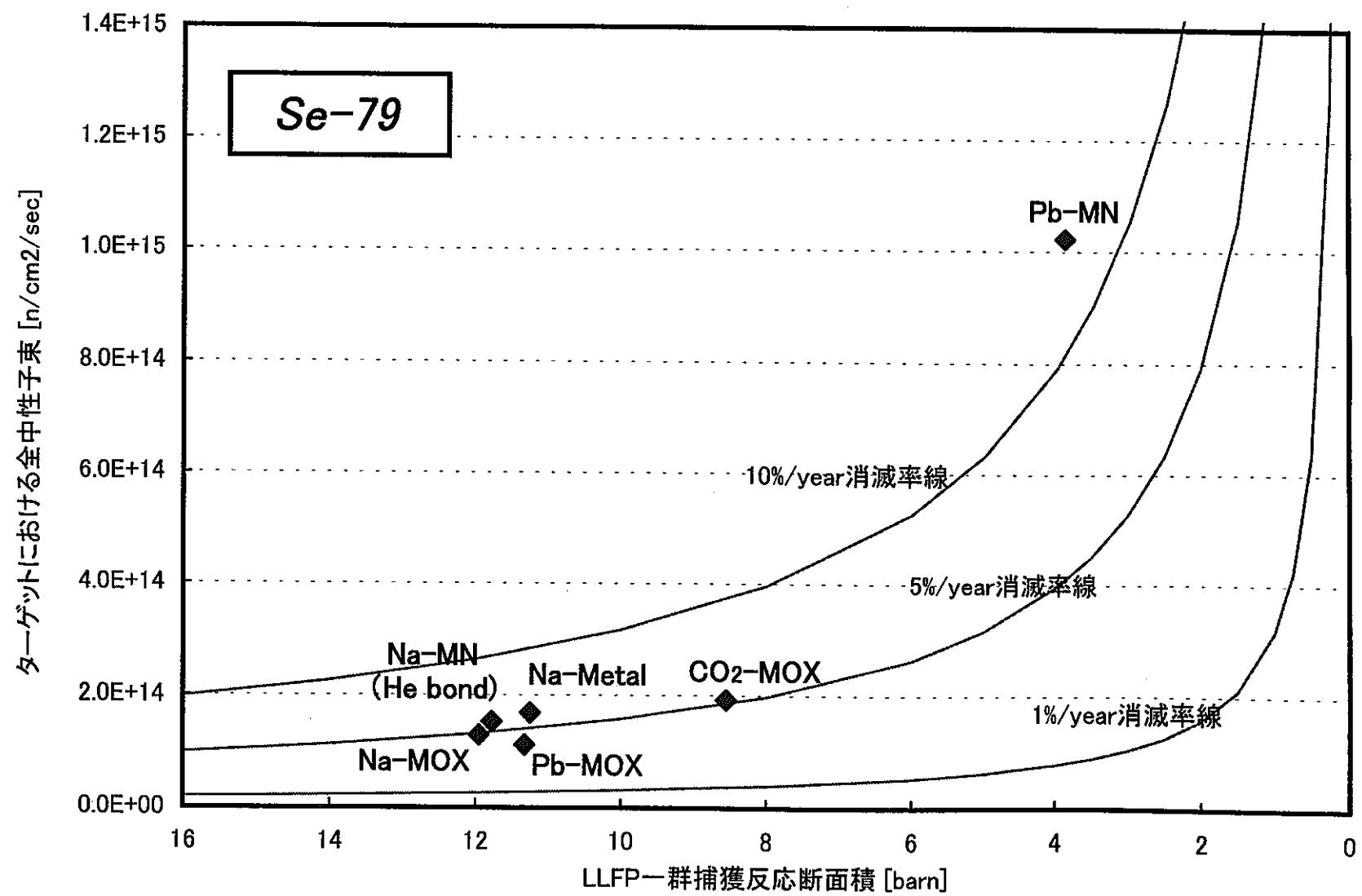


図8.1 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(Se-79)

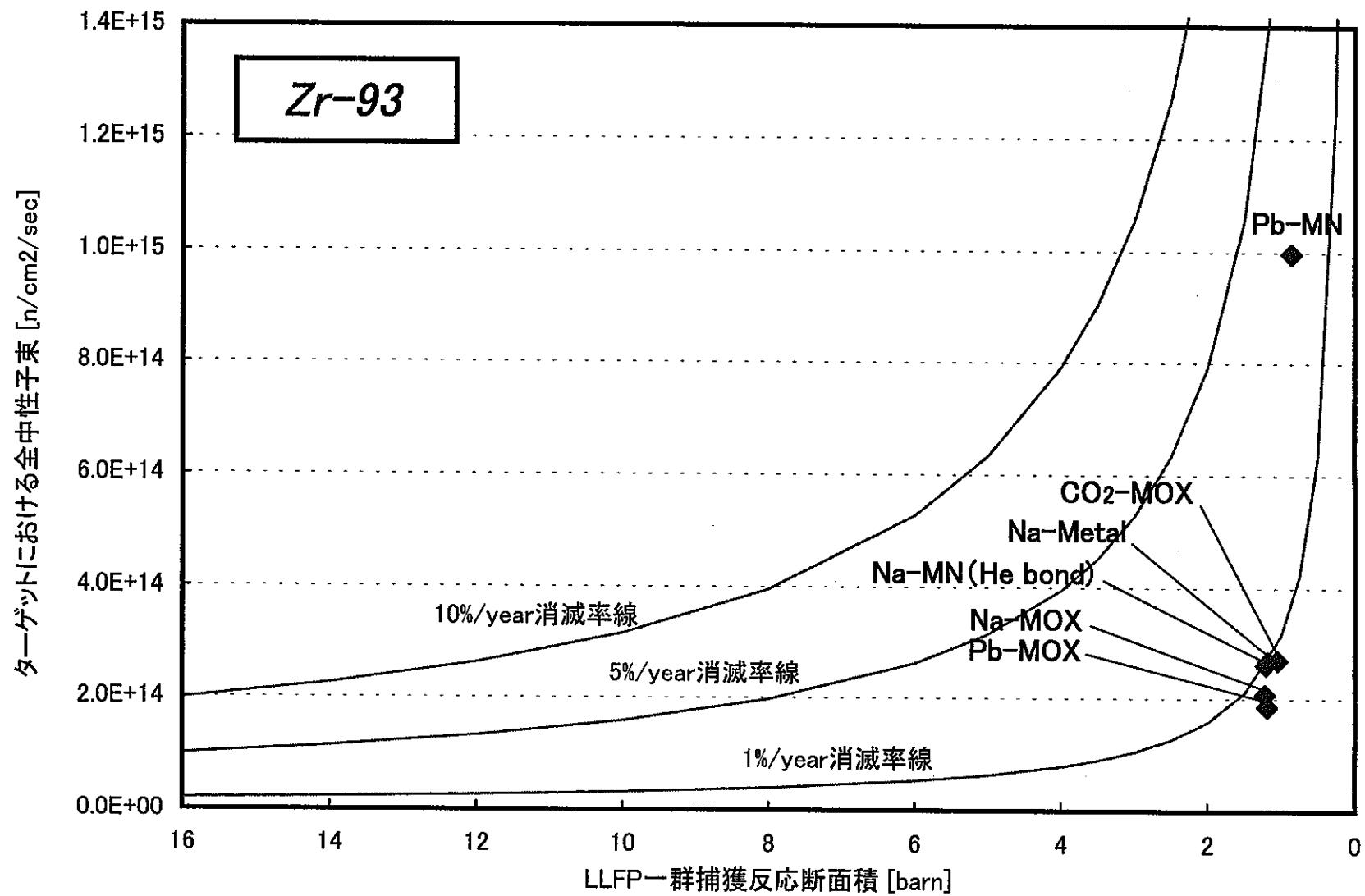


図8.2 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(Zr-93)

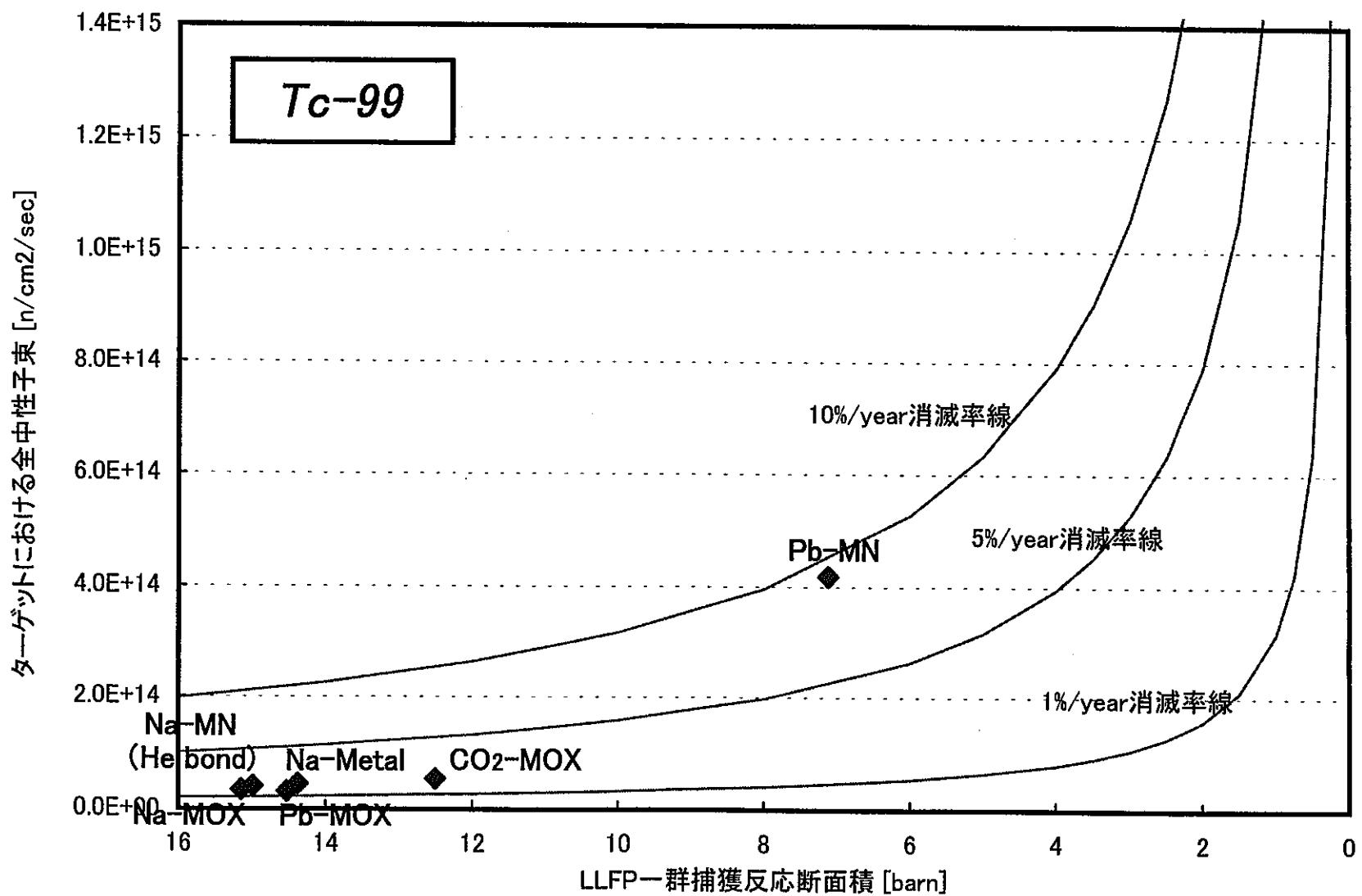


図8.3 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(Tc-99)

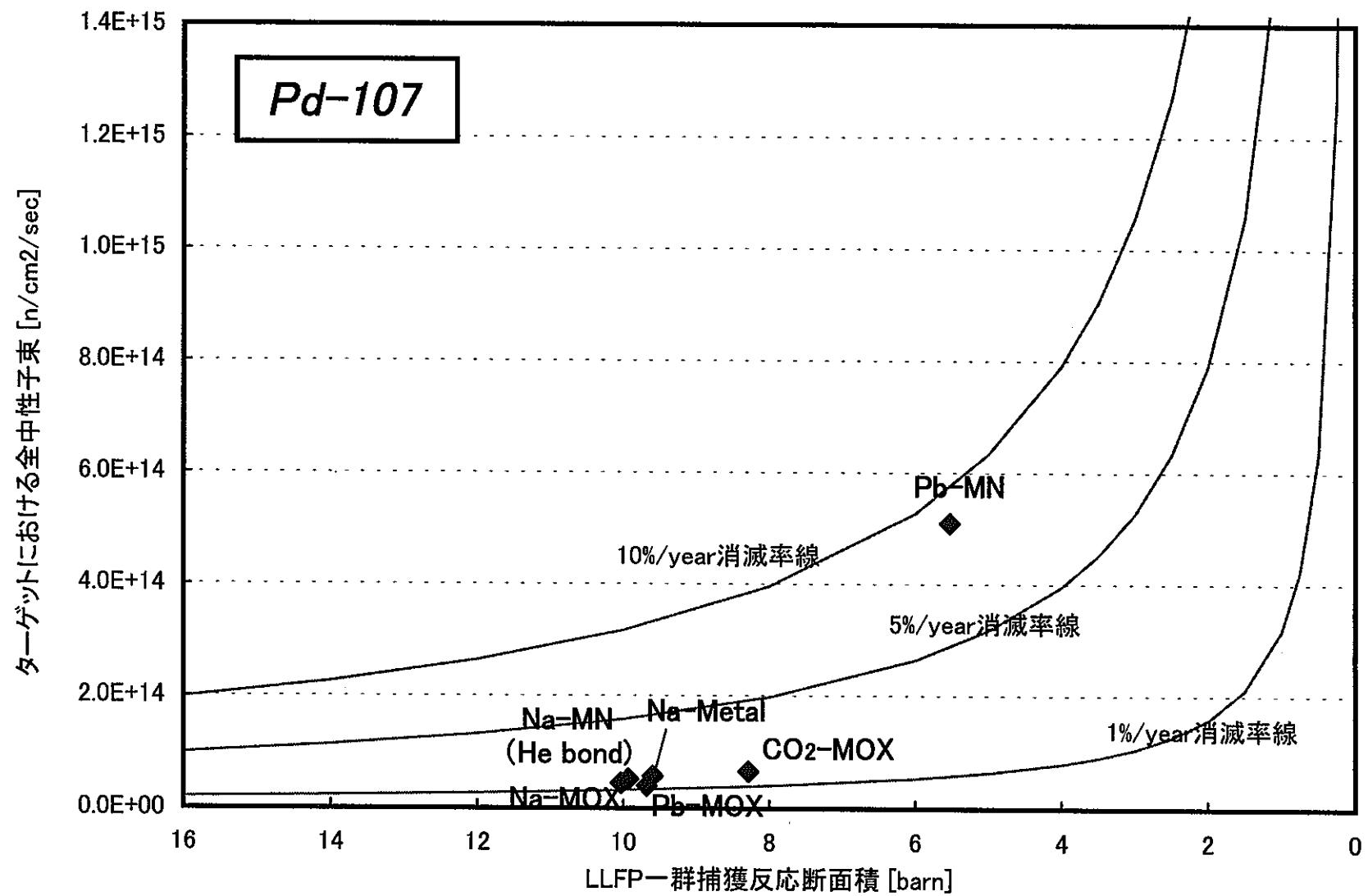


図8.4 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(Pd-107)

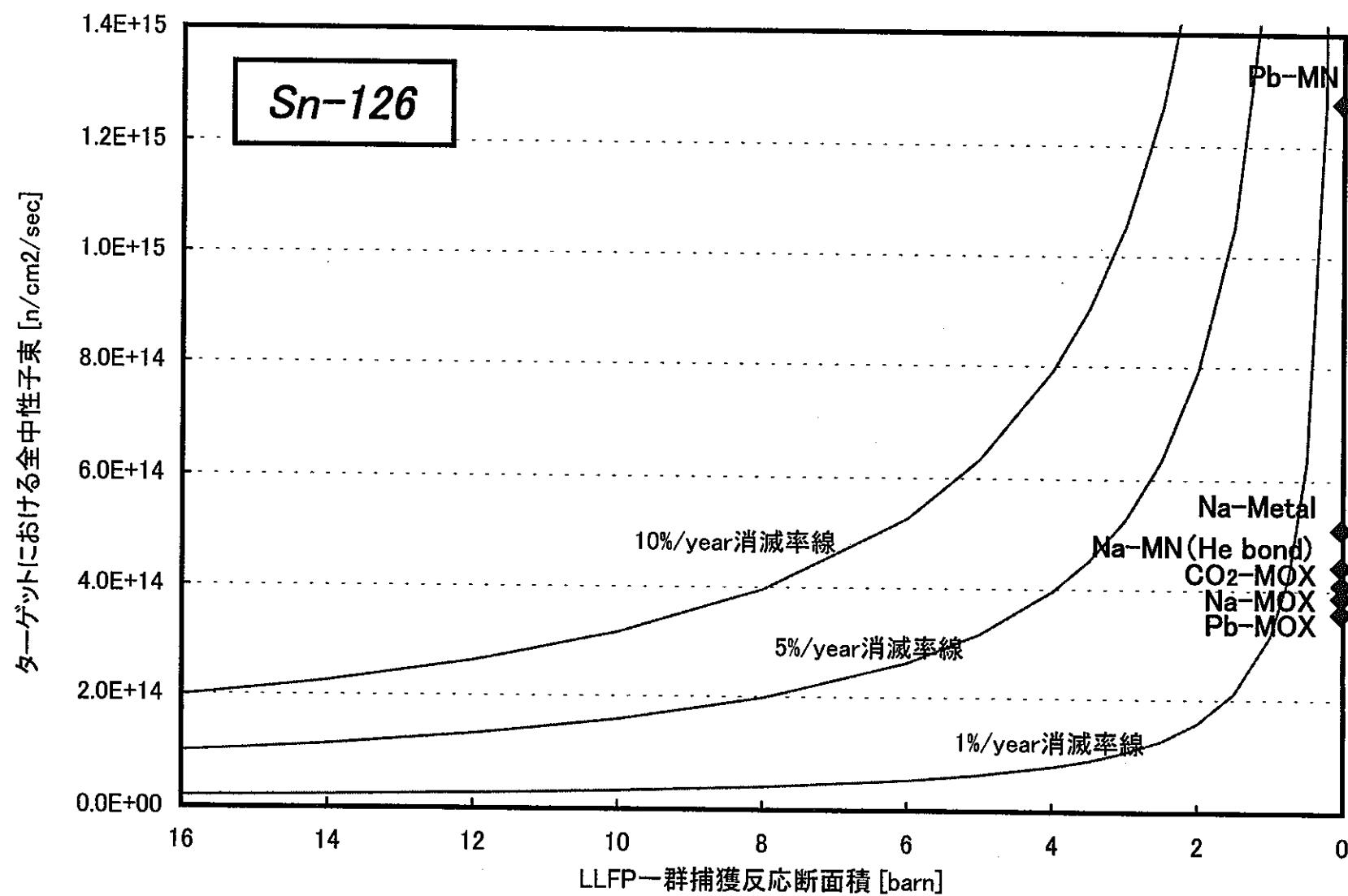


図8.5 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(Sn-126)

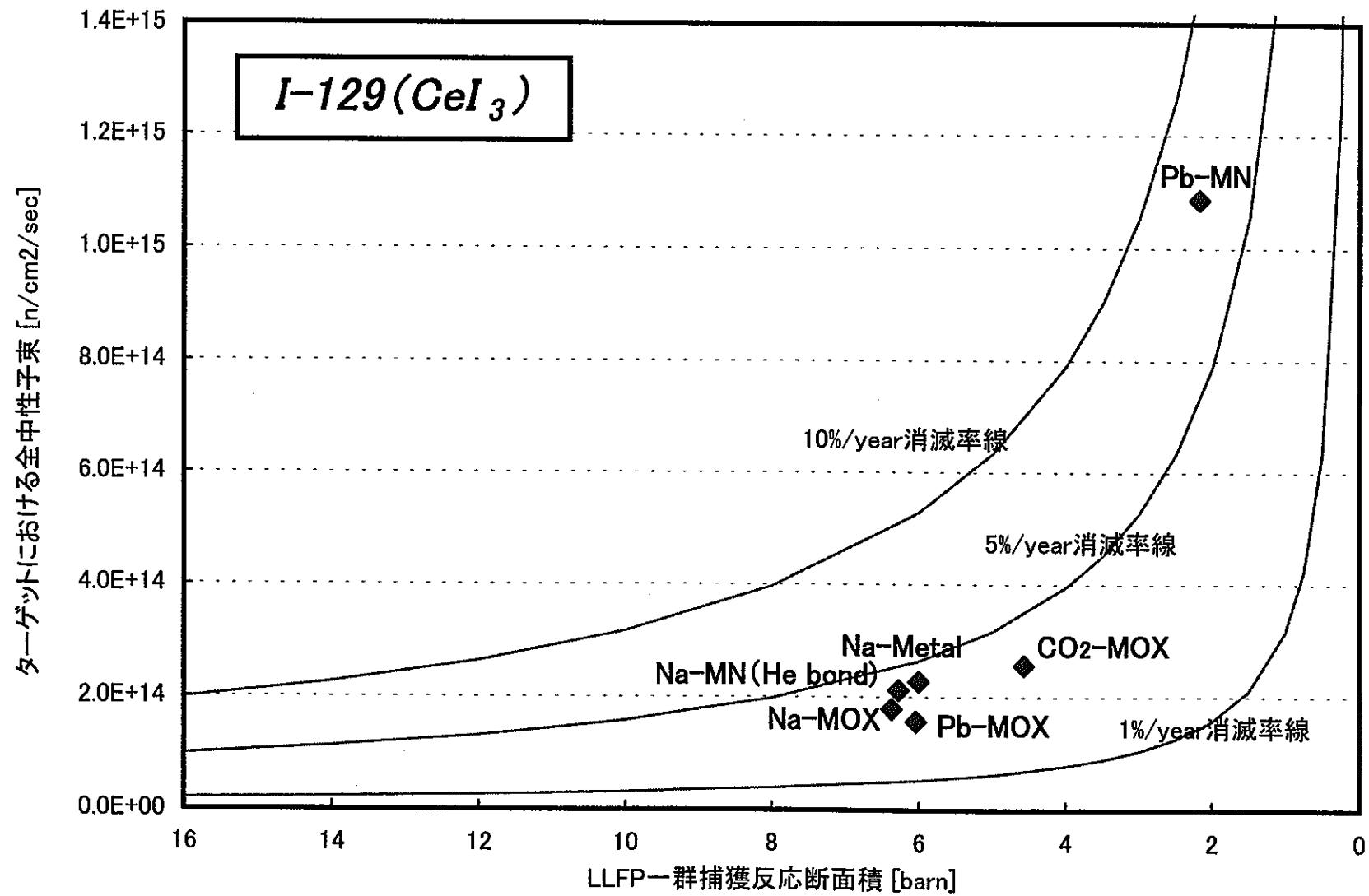


図8.6 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(I-129(CeI_3))

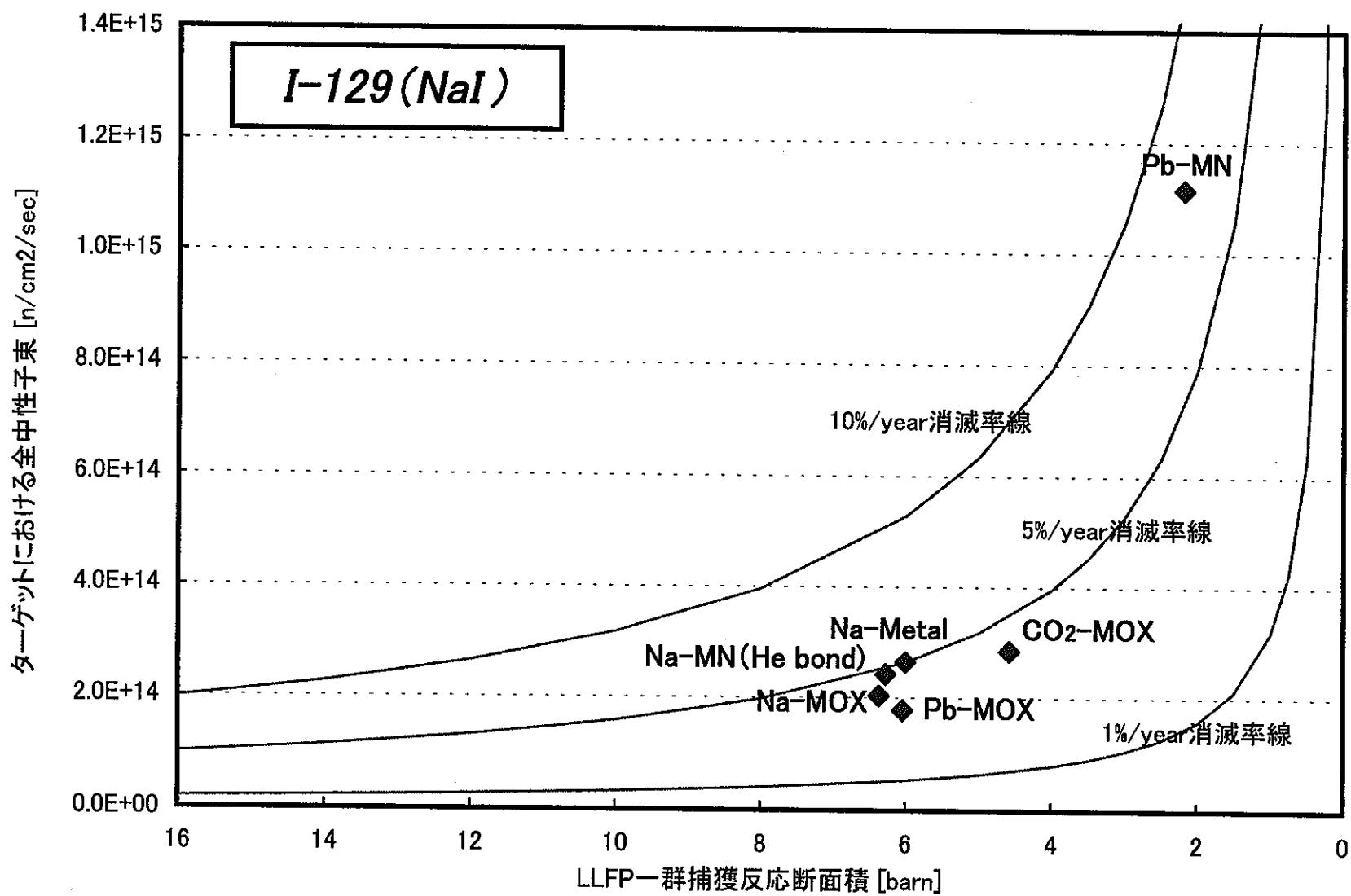


図8.7 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(I-129(NaI))

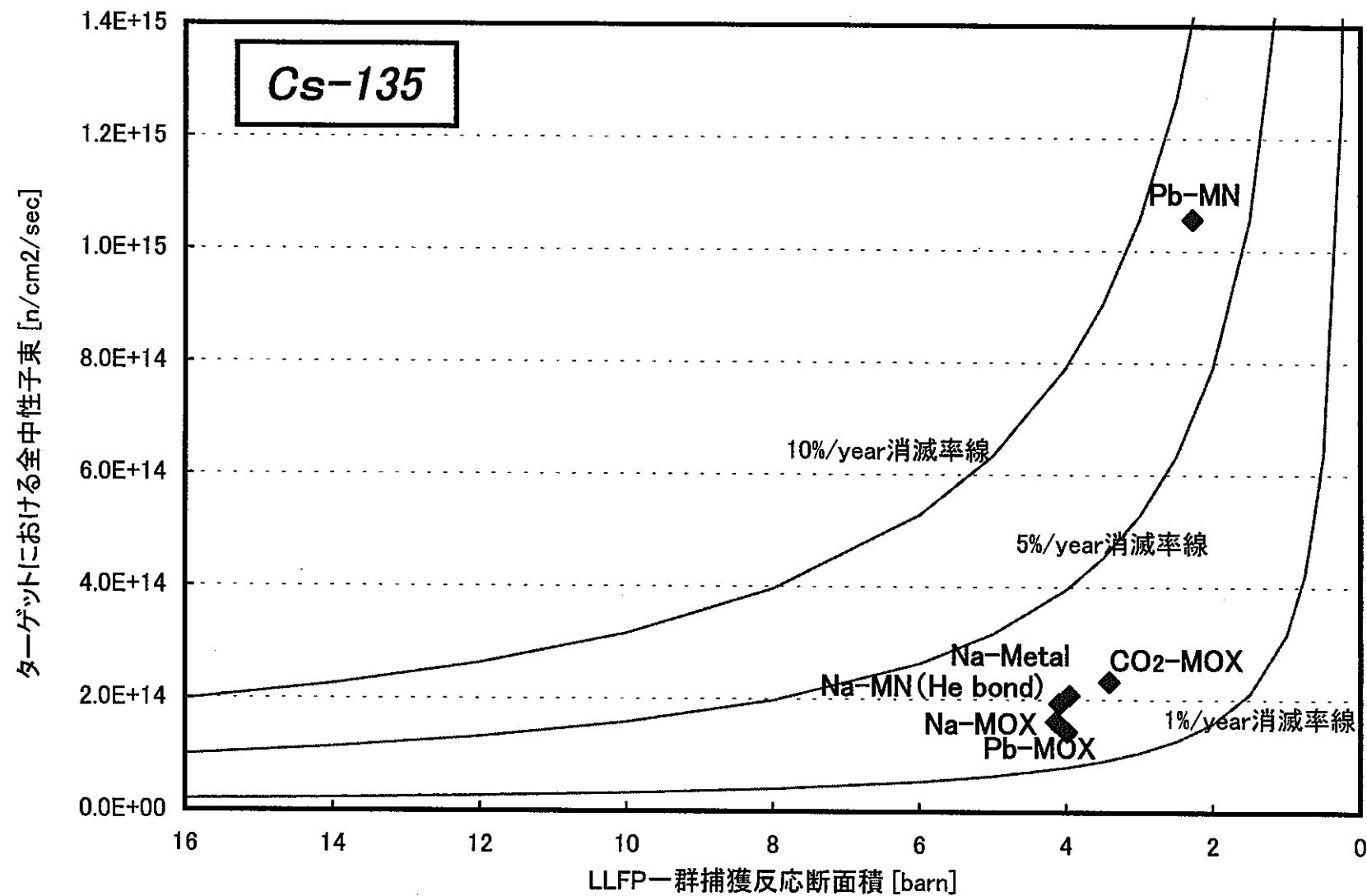


図8.8 LLFP捕獲反応断面積、中性子束レベル、消滅率の関係(Cs-135)

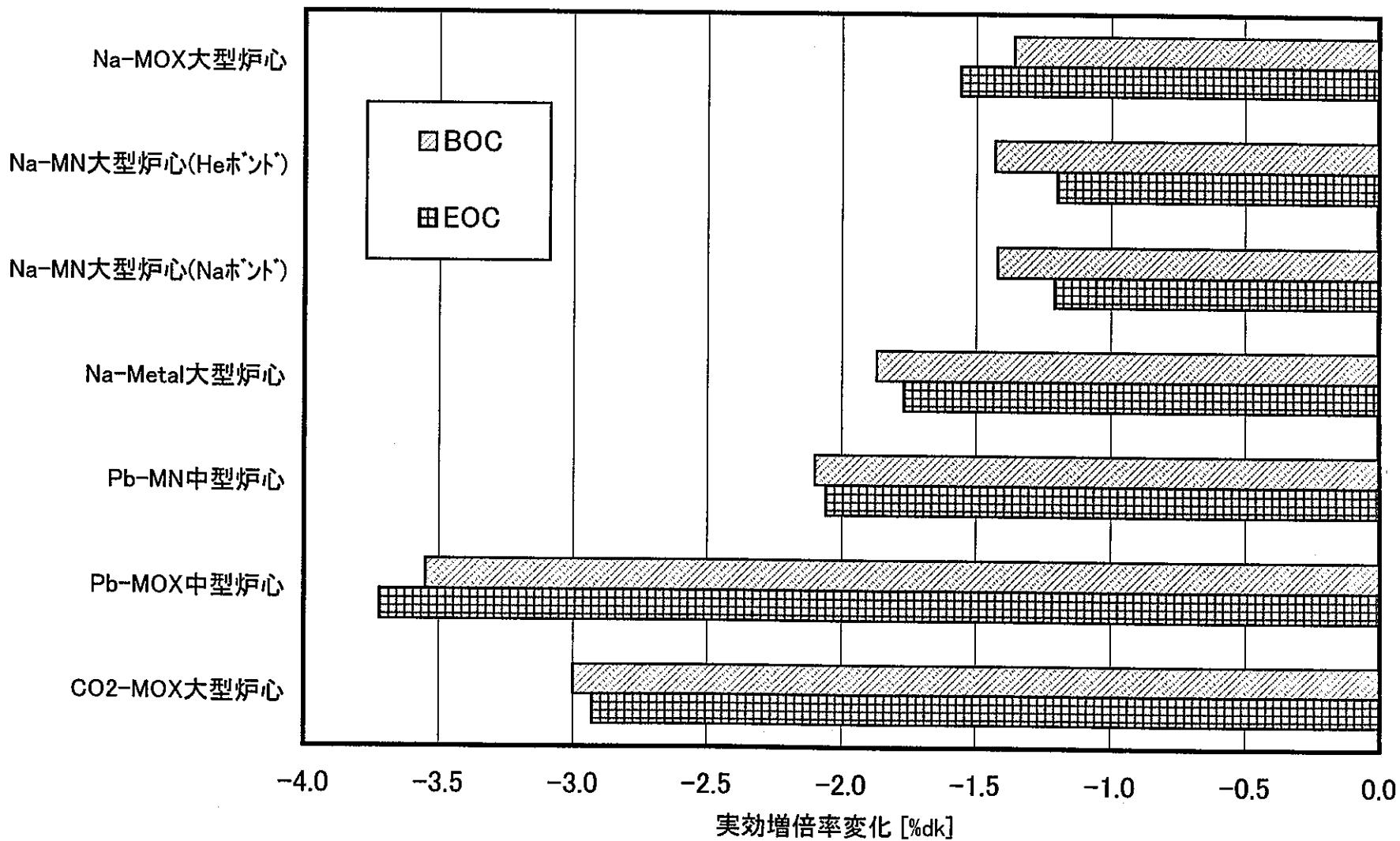


図9.1 LLFPターゲット装荷による実効増倍率の変化(T_{c-99})

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

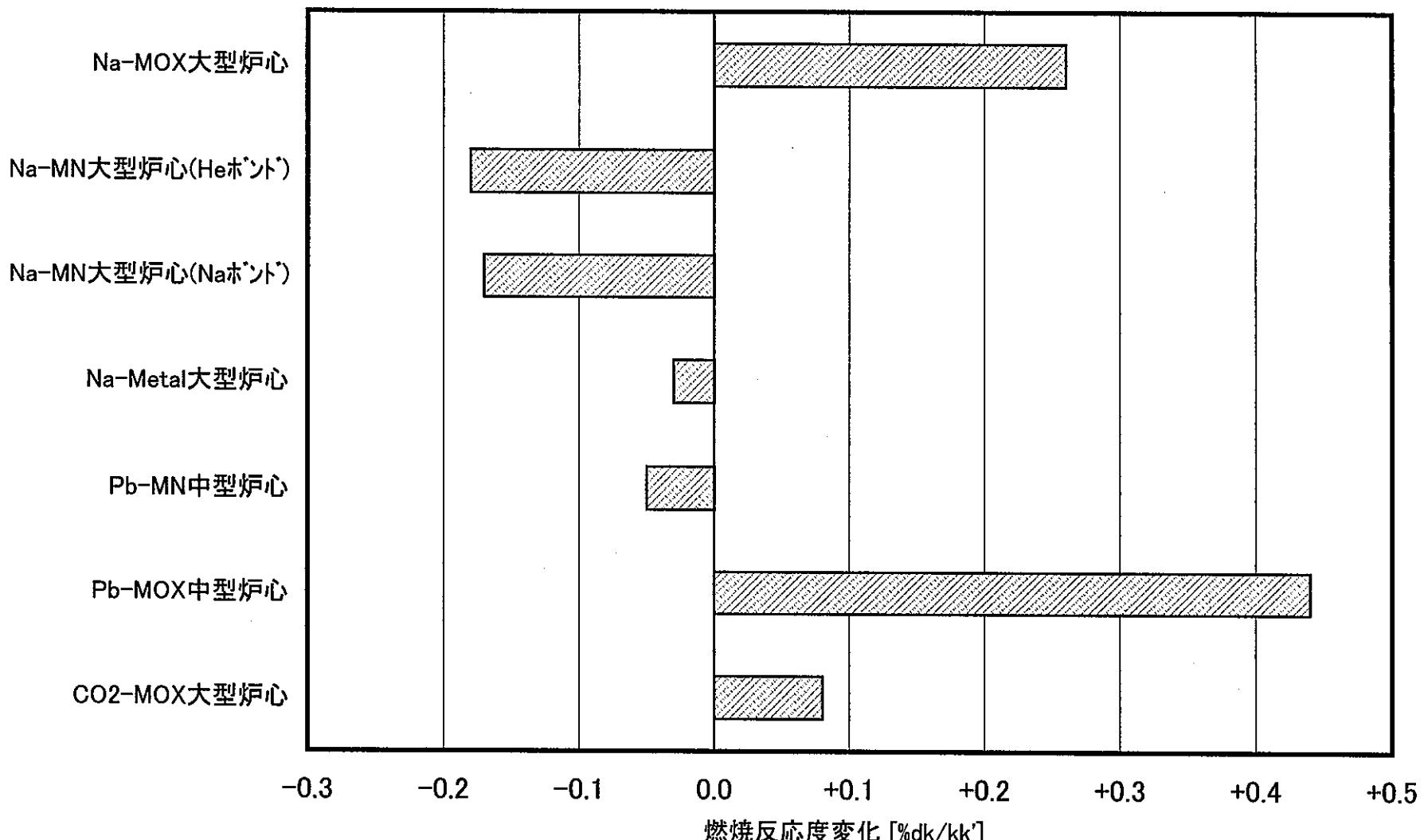


図9.2 LLFPターゲット装荷による燃焼反応度の変化(Tc-99)

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

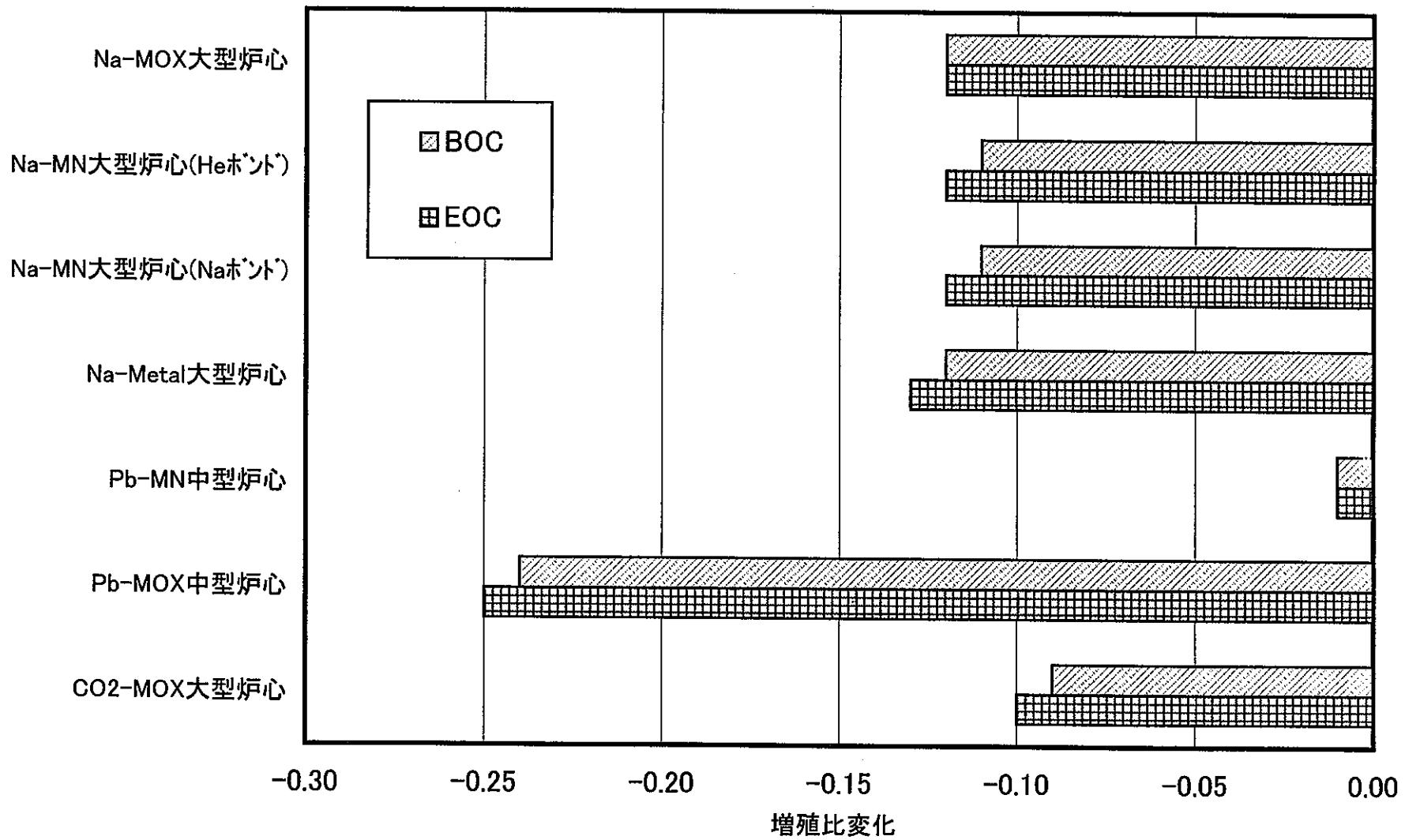


図9.3 LLFPターゲット装荷による増殖比の変化($Tc-99$)

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

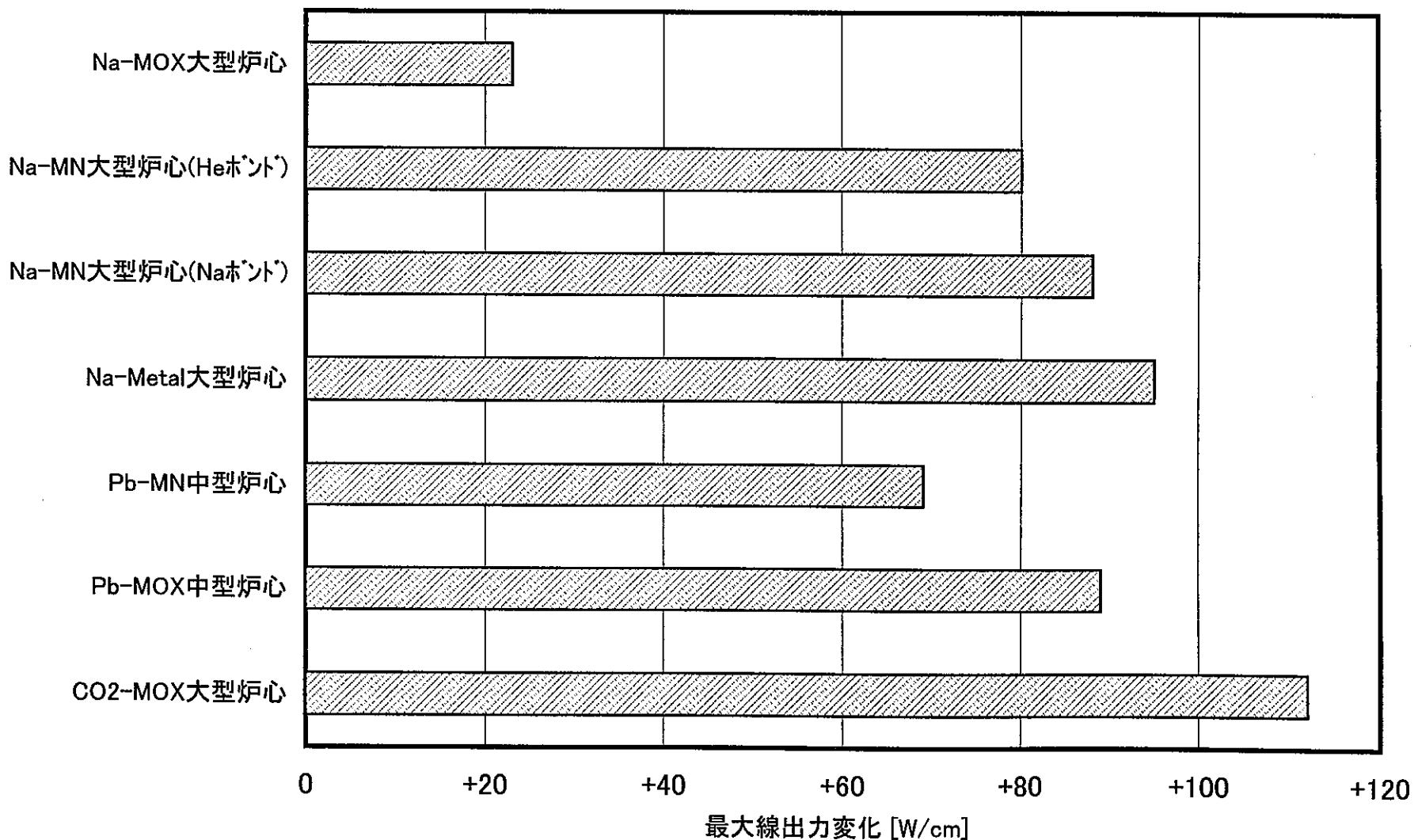


図9.4 LLFPターゲット装荷による最大線出力の変化(Tc-99)
※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表1 検討対象炉心の主な仕様

	Na-MOX 大型炉	Na-MN 大型炉 (Heボンド)	Na-MN 大型炉 (Naボンド)	Na-Metal 大型炉	Pb-MN 中型炉	Pb-MOX 中型炉	CO ₂ -MOX 大型炉
・原子炉熱出力 [MW _{th}]	3800	←	←	←	700	←	3600
・運転サイクル長さ [EFPD]	540	←	←	←	284	540	344
・燃料交換バッチ数(炉心/RB)	5/5	←	←	←	5/-	5/5	←
・取出平均燃焼度 [MWd/t]	15万	←	←	←	6万	15万	12万
・炉心高さ [cm]	120	←	←	←	110	120	150
・原子炉出入口温度 [°C]	550/395	←	←	←	540/420	550/395	525/240
・冷却材圧力損失 [kg/cm ²]	約3	←	↑	↑	約1	約3	>3?
・燃料化学形	(U, Pu)O _{1.98}	(U, Pu) ¹⁵ N	←	U-Pu-10Zr	(U, Pu) ¹⁵ N	(U, Pu)O _{1.98}	←
・Pu富化度 (IC/MC/OC) [wt%]	17.7/-/20.1	15.2/-/17.1	14.3/-/16.3	14.9/-/16.9	14.0/14.0/14.0	19.0/-/24.7	18.7/-/26.8
・Pu同位体組成比 [wt%] (Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242 /Am241/Am242m/Am243)	3/52/27/9.5/ 7/1.5/0/0	←	←	←	0.5/64/28/3.1/ 1.7/2.1/0.1/0.5	3/52/27/9.5/ 7/1.5/0/0	1.9/52.8/25.5 /9.9/7.9/2.0/ 0/0
・ピン径 [mm]	9.7	8.78	8.40	9.02	9.1/9.6/10.4*	9.7	8.2
・スミア密度 [%TD]	82	80	←	7.5	83.1/84.2/87.8*	82	86.4
・集合体あたりピン本数	234(IC), 271(OC)	←	←	←	114	271	169
・P/D	1.15	1.18	1.20	1.17	1.49/1.42/1.31*	1.27	1.55
・体積比 [%] (燃料/構造材/冷却材)	40.2/19.8/40.0 (IC) 46.5/21.3/32.2 (OC)	39.5/25.4/35.1 (OC)	41.4/21.8/36.8 (OC)	38.8/27.0/34.2 (OC)	23.1/9.3/67.6 (IC) 26.4/9.7/63.9 (MC) 32.2/11.1/56.7 (OC)	38.1/16.9/45.0	25.4/15.4/59.2
・集合体配列ピッチ [mm]	195.4	182.8	178.2	185.9	149.6	216.0	180.6
・燃料集合体本数 (IC/MC/OC)	246/-/216	252/-/210	←	←	57/72/56	30/-/54	334/-/216
・等価炉心直徑 [cm]	458	429	418	436	230	216	458
・炉心部重金属インベントリ [t]	63	63	63	64	16	12	50

* IC/MC/OC

表2 LLFPの化学形及び数密度

(a) LLFP

LLFP	化学形	密度*	分子量*	化合物数密度
		[g/cm ³]	[g/mol]	[10 ²⁴ /cm ³]
⁷⁹ Se	Se ₄ Zr ₅	5.5	771.94	4.3E-03
⁹³ Zr	Zr (metal)	6.52	91.22	4.30E-02
⁹⁹ Tc	Tc (metal)	11.487	98.91	6.99E-02
¹⁰⁷ Pd	Pd (metal)	12.023	106.4	6.80E-02
¹²⁶ Sn	SnO ₂	6.95	150.70	2.78E-02
¹²⁹ I	CeI ₃	5.6	520.83	6.5E-03
	NaI	3.667	149.92	1.47E-02
¹³⁵ Cs	CsCl	3.988	168.36	1.43E-02

* 天然組成の場合の値 (出展:Lange's Handbook of Chemistry, McGraw-Hill (1979))

核種	核種数密度 [10 ²⁴ /cm ³]
⁷⁹ Se	1.7E-02
Zr (natural)	2.1E-02
⁹³ Zr	4.30E-02
⁹⁹ Tc	6.99E-02
¹⁰⁷ Pd	6.80E-02
¹²⁶ Sn	2.78E-02
¹⁶ O	5.55E-02
¹²⁹ I	1.9E-02
¹⁴⁰ Ce	5.8E-03
¹⁴² Ce	7.1E-04
¹²⁹ I	1.47E-02
²³ Na	1.47E-02
¹³⁵ Cs	1.43E-02
Cl (natural)	1.43E-02

(b) 減速材

減速材化学形	密度*	分子量*	化合物数密度
	[g/cm ³]	[g/mol]	[10 ²⁴ /cm ³]
ZrH _{1.7}	5.61	93.24	3.62E-02

* 天然組成の場合の値 (出展:Lange's Handbook of Chemistry, McGraw-Hill (1979))

核種	核種数密度 [10 ²⁴ /cm ³]
¹ H	6.16E-02
Zr (natural)	3.62E-02

表3 LLFPターゲット集合体の仕様

	Na-MOX 大型炉	Na-MN 大型炉 (Heボンド)	Na-MN 大型炉 (Naボンド)	Na-Metal 大型炉	Pb-MN 中型炉	Pb-MOX 中型炉	CO ₂ -MOX 大型炉
・ターゲット集合体本数	150	←	←	←	44	78	186
・LLFP充填スタック長さ [cm]	131.2	←	←	130	110	131.2	190
・集合体あたりピン本数	127	←	←	←	114	127	169
・スミア密度 [%TD]	70	←	←	←	←	←	←
・減速材ピン割合 [vol%]	80	←	←	←	←	←	←
・ピン径 [mm]	14.98	14.04	13.67	14.27	9.1	15.00	12.64
・被覆管肉厚 [mm]	0.40	0.38	0.37	0.38	0.5	0.40	0.42
・ワイヤ径 [mm]	1.22	1.11	1.08	1.13	(グリッドスペー サー使用)	←	←
・集合体配列ピッチ [mm]	195.39	182.77	178.22	185.87	149.6	216.01	180.62
・ダクト肉厚 [mm]	3.00	2.70	2.70	2.80	(ダクトレス)	3.00	4.40
・ダクト間ギャップ [mm]	3.00	←	←	←	(ダクトレス)	3.00	5.00

表4 エネルギー群構造

Group	Upper Energy [eV]	Lower Energy [eV]	Lethargy Width
1	1.0000E+07	6.0653E+06	0.50
2	6.0653E+06	3.6788E+06	0.50
3	3.6788E+06	2.2313E+06	0.50
4	2.2313E+06	1.3534E+06	0.50
5	1.3534E+06	8.2085E+05	0.50
6	8.2085E+05	3.8774E+05	0.75
7	3.8774E+05	1.8316E+05	0.75
8	1.8316E+05	8.6517E+04	0.75
9	8.6517E+04	4.0868E+04	0.75
10	4.0868E+04	1.9305E+04	0.75
11	1.9305E+04	9.1188E+03	0.75
12	9.1188E+03	4.3074E+03	0.75
13	4.3074E+03	2.0347E+03	0.75
14	2.0347E+03	9.6112E+02	0.75
15	9.6112E+02	1.0130E+02	2.25
16	1.0130E+02	8.3153E+00	2.50
17	8.3153E+00	8.7642E-01	2.25
18	8.7642E-01	1.0000E-05	11.38

表5.1 LLFP消滅特性解析結果(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)

炉出力 [MW _{th}]	3800
サイクル長さ [day]	540
LLFPターゲット集合体数	150

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消滅量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 [/year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	991.7	920.0	0.2	71.7	7.2%	0.4	12.8	4.9%
Zr-93	Zr (metal)	3275.5	3235.1	31.1	40.4	1.2%	115.5	7.2	0.8%
Tc-99	Tc (metal)	5540.2	5406.1	43.1	134.1	2.4%	48.2	23.9	1.6%
Pd-107	Pd (metal)	5867.5	5749.1	21.5	118.4	2.0%	27.2	21.1	1.4%
Sn-126	SnO ₂	2924.5	2923.2	3.3	1.3	0.04%	380.8	0.2	0.03%
I-129	CeI ₃	1904.5	1804.3	14.4	100.2	5.3%	21.6	17.8	3.6%
	NaI	1416.9	1330.8	14.4	86.1	6.1%	25.1	15.3	4.1%
Cs-135	CsCl	1523.9	1476.3	80.3	47.6	3.1%	253.0	8.5	2.1%

表5.2 LLFP消滅特性解析結果(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(Heボンド))

炉出力 [MW _{th}]	3800
サイクル長さ [day]	540
LLFPターゲット集合体数	150

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消滅量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 [/year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	849.5	777.5	0.3	72.0	8.5%	0.6	12.8	5.7%
Zr-93	Zr (metal)	2854.7	2813.3	31.3	41.4	1.5%	113.4	7.4	1.0%
Tc-99	Tc (metal)	4809.4	4672.4	42.8	137.0	2.8%	46.9	24.4	1.9%
Pd-107	Pd (metal)	5099.8	4978.5	21.2	121.3	2.4%	26.2	21.6	1.6%
Sn-126	SnO ₂	2571.0	2569.7	3.4	1.3	0.05%	392.3	0.2	0.03%
I-129	CeI ₃	1640.2	1539.3	14.4	100.9	6.2%	21.4	18.0	4.2%
	NaI	1217.8	1131.4	14.4	86.4	7.1%	25.0	15.4	4.8%
Cs-135	CsCl	1320.3	1272.0	80.7	48.3	3.7%	250.6	8.6	2.5%

表5.3 LLFP消滅特性解析結果(ナトリウム冷却塗化物燃料炉心(Naボンド))

炉出力 [MW _{th}]	3800
サイクル長さ [day]	540
LLFPターゲット集合体数	150

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消滅量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 /[year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	805.0	735.5	0.3	69.5	8.6%	0.6	12.4	5.8%
Zr-93	Zr (metal)	2709.7	2668.9	31.4	40.8	1.5%	115.4	7.3	1.0%
Tc-99	Tc (metal)	4563.4	4429.7	42.7	133.7	2.9%	47.9	23.8	2.0%
Pd-107	Pd (metal)	4837.0	4717.0	21.0	120.0	2.5%	26.3	21.4	1.7%
Sn-126	SnO ₂	2443.1	2441.8	3.4	1.3	0.05%	392.3	0.2	0.04%
I-129	CeI ₃	1555.3	1457.7	14.4	97.6	6.3%	22.1	17.4	4.2%
	NaI	1154.6	1071.2	14.4	83.4	7.2%	25.9	14.8	4.9%
Cs-135	CsCl	1251.6	1204.1	80.8	47.5	3.8%	255.2	8.5	2.6%

表5.4 LLFP消滅特性解析結果(ナトリウム冷却金属燃料炉心)

炉出力 [MW _{th}]	3800
サイクル長さ [day]	540
LLFPターゲット集合体数	150

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消滅量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 [/year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	872.2	795.4	0.3	76.8	8.8%	0.6	13.7	6.0%
Zr-93	Zr (metal)	2938.1	2893.1	31.4	45.0	1.5%	104.7	8.0	1.0%
Tc-99	Tc (metal)	4943.2	4795.8	43.2	147.4	3.0%	44.0	26.2	2.0%
Pd-107	Pd (metal)	5251.7	5119.5	21.5	132.2	2.5%	24.4	23.5	1.7%
Sn-126	SnO ₂	2646.7	2645.2	3.4	1.5	0.06%	340.0	0.3	0.04%
I-129	CeI ₃	1684.5	1576.7	14.5	107.8	6.4%	20.2	19.2	4.3%
	NaI	1252.9	1160.6	14.5	92.3	7.4%	23.6	16.4	5.0%
Cs-135	CsCl	1347.8	1295.7	81.2	52.1	3.9%	233.8	9.3	2.6%

表5.5 LLFP消滅特性解析結果(鉛冷却窒化物燃料炉心)

炉出力 [MW _{th}]	700
サイクル長さ [day]	284
LLFPターゲット集合体数	44

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消滅量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 /[year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	23.5	21.2	0.03	2.3	9.8%	0.6	4.2	12.6%
Zr-93	Zr (metal)	79.7	78.0	3.0	1.7	2.1%	77.6	3.1	2.7%
Tc-99	Tc (metal)	124.9	115.8	4.5	9.1	7.3%	21.8	16.7	9.4%
Pd-107	Pd (metal)	132.0	122.9	2.4	9.1	6.9%	11.6	16.7	8.9%
Sn-126	SnO ₂	72.78	72.75	0.3	0.03	0.04%	440.0	0.06	0.05%
I-129	CeI ₃	46.5	43.8	1.4	2.7	5.8%	22.8	5.0	7.5%
	NaI	35.0	32.9	1.4	2.1	6.0%	29.3	3.9	7.7%
Cs-135	CsCl	35.7	33.6	7.8	2.1	5.9%	163.4	3.9	7.6%

表5.6 LLFP消滅特性解析結果(鉛冷却酸化物燃料炉心)

炉出力 [MW _{th}]	700
サイクル長さ [day]	540
LLFPターゲット集合体数	78

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消滅量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 [/year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	527.9	496.3	0.06	31.6	6.0%	0.1	30.5	4.0%
Zr-93	Zr (metal)	1708.2	1690.5	5.7	17.7	1.0%	25.1	17.1	0.7%
Tc-99	Tc (metal)	2899.4	2839.9	8.0	59.5	2.1%	10.5	57.5	1.4%
Pd-107	Pd (metal)	3067.8	3014.7	4.0	53.1	1.7%	5.9	51.3	1.2%
Sn-126	SnO ₂	1521.7	1521.1	0.6	0.6	0.04%	78.0	0.6	0.03%
I-129	CeI ₃	1001.9	958.1	2.7	43.8	4.4%	4.8	42.3	3.0%
	NaI	751.8	714.0	2.7	37.8	5.0%	5.6	36.5	3.4%
Cs-135	CsCl	796.8	775.7	14.8	21.1	2.6%	54.7	20.4	1.8%

表5.7 LLFP消滅特性解析結果(炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心)

炉出力 [MW _{th}]	3600
サイクル長さ [day]	344
LLFPターゲット集合体数	186

LLFP	化学形	ターゲットにおけるLLFP重量 [kg]		炉心部におけるLLFP生成量 [kg/cycle]	ターゲットにおけるLLFP消滅特性		炉心部で生成したLLFPを消滅するのに必要なターゲット数	炉出力とサイクル長さで規格化したターゲットにおけるLLFP消滅特性	
		BOC	EOC		消減量 [kg/cycle]	消滅率 [/cycle]		消滅量 [kg/GW _{th} /year]	消滅率 /[year]
Se-79	Se ₄ Zr ₅	1335.7	1270.2	0.2	65.5	4.9%	0.6	19.3	5.2%
Zr-93	Zr (metal)	4244.0	4207.7	19.0	36.3	0.9%	97.4	10.7	0.9%
Tc-99	Tc (metal)	7187.4	7047.6	27.8	139.8	1.9%	37.0	41.2	2.1%
Pd-107	Pd (metal)	7592.2	7468.4	14.5	123.8	1.6%	21.8	36.5	1.7%
Sn-126	SnO ₂	3778.6	3777.7	2.0	0.9	0.02%	413.3	0.3	0.03%
I-129	CeI ₃	2519.5	2432.0	9.1	87.5	3.5%	19.3	25.8	3.7%
	NaI	1899.4	1825.8	9.1	73.6	3.9%	23.0	21.7	4.1%
Cs-135	CsCl	1982.3	1936.2	49.8	46.1	2.3%	200.9	13.6	2.5%

表6.1 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却酸化物燃料炉心)

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']	増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC		BOC	EOC	
Se-79	Se ₄ Zr ₅	-1.31	-1.52	+0.27	-0.12	-0.12	+22
Zr-93	Zr (metal)	-1.27	-1.50	+0.29	-0.13	-0.12	+22
Tc-99	Tc (metal)	-1.36	-1.56	+0.26	-0.12	-0.12	+23
Pd-107	Pd (metal)	-1.37	-1.57	+0.27	-0.12	-0.12	+24
Sn-126	SnO ₂	-1.20	-1.45	+0.31	-0.13	-0.12	+21
I-129	CeI ₃	-1.32	-1.54	+0.28	-0.12	-0.12	+23
	NaI	-1.33	-1.55	+0.28	-0.12	-0.12	+23
Cs-135	CsCl	-1.35	-1.56	+0.28	-0.12	-0.12	+24

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表6.2 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(Heボンド))

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']	増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC		BOC	EOC	
Se-79	Se ₄ Zr ₅	-1.37	-1.15	-0.17	-0.11	-0.12	+77
Zr-93	Zr (metal)	-1.32	-1.13	-0.15	-0.11	-0.12	+74
Tc-99	Tc (metal)	-1.43	-1.20	-0.18	-0.11	-0.12	+80
Pd-107	Pd (metal)	-1.43	-1.21	-0.17	-0.11	-0.12	+80
Sn-126	SnO ₂	-1.26	-1.08	-0.14	-0.11	-0.12	+70
I-129	CeI ₃	-1.39	-1.18	-0.16	-0.11	-0.12	+78
	NaI	-1.38	-1.17	-0.16	-0.11	-0.12	+77
Cs-135	CsCl	-1.41	-1.19	-0.16	-0.11	-0.12	+79

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表6.3 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却窒化物燃料炉心(Naボンド))

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']	増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC		BOC	EOC	
Se-79	Se ₄ Zr ₅	-1.33	-1.13	-0.17	-0.11	-0.12	+82
Zr-93	Zr (metal)	-1.28	-1.10	-0.14	-0.12	-0.12	+79
Tc-99	Tc (metal)	-1.42	-1.21	-0.17	-0.11	-0.12	+88
Pd-107	Pd (metal)	-1.43	-1.23	-0.16	-0.11	-0.12	+89
Sn-126	SnO ₂	-1.21	-1.05	-0.13	-0.12	-0.12	+78
I-129	CeI ₃	-1.33	-1.14	-0.16	-0.11	-0.12	+82
	NaI	-1.32	-1.13	-0.15	-0.11	-0.12	+82
Cs-135	CsCl	-1.35	-1.16	-0.16	-0.11	-0.12	+83

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表6.4 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(ナトリウム冷却金属燃料炉心)

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']	増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC		BOC	EOC	
Se-79	Se ₄ Zr ₅	-1.77	-1.68	-0.02	-0.12	-0.13	+89
Zr-93	Zr (metal)	-1.72	-1.66	+0.01	-0.13	-0.13	+86
Tc-99	Tc (metal)	-1.87	-1.77	-0.03	-0.12	-0.13	+95
Pd-107	Pd (metal)	-1.88	-1.80	-0.01	-0.12	-0.13	+96
Sn-126	SnO ₂	-1.64	-1.59	+0.02	-0.13	-0.13	+81
I-129	CeI ₃	-1.78	-1.70	-0.01	-0.12	-0.13	+89
	NaI	-1.77	-1.69	0.00	-0.12	-0.13	+89
Cs-135	CsCl	-1.80	-1.72	-0.01	-0.12	-0.13	+91

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表6.5 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(鉛冷却窒化物燃料炉心)

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']		増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	
Se-79	Se ₄ Zr ₅	-1.75	-1.57	-0.23	-0.01	-0.01	-0.01	+51
Zr-93	Zr (metal)	-1.75	-1.58	-0.19	-0.01	-0.01	-0.01	+51
Tc-99	Tc (metal)	-2.10	-2.06	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	+69
Pd-107	Pd (metal)	-2.23	-2.20	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01	+75
Sn-126	SnO ₂	-1.63	-1.42	-0.23	-0.01	-0.01	-0.01	+45
I-129	CeI ₃	-1.72	-1.53	-0.20	-0.01	-0.01	-0.01	+50
	NaI	-1.71	-1.51	-0.21	-0.01	-0.01	-0.01	+49
Cs-135	CsCl	-1.74	-1.55	-0.20	-0.01	-0.01	-0.01	+51

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表6.6 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(鉛冷却酸化物燃料炉心)

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']	増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC		BOC	EOC	
Se-79	Se_4Zr_5	-3.14	-3.30	+0.40	-0.25	-0.26	+77
Zr-93	Zr (metal)	-2.86	-3.05	+0.42	-0.25	-0.26	+71
Tc-99	Tc (metal)	-3.55	-3.72	+0.44	-0.24	-0.25	+89
Pd-107	Pd (metal)	-3.51	-3.69	+0.45	-0.24	-0.26	+88
Sn-126	SnO_2	-2.57	-2.79	+0.42	-0.26	-0.26	+66
I-129	CeI_3	-3.08	-3.25	+0.41	-0.25	-0.26	+75
	NaI	-3.02	-3.19	+0.40	-0.25	-0.26	+74
Cs-135	CsCl	-3.15	-3.32	+0.42	-0.25	-0.26	+77

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定

表6.7 LLFPターゲット装荷による炉心特性への影響(炭酸ガス冷却酸化物燃料炉心)

LLFP	化学形	実効増倍率変化 [%dk]		燃焼反応度変化 [%dk/kk']	増殖比変化		最大線出力変化 [W/cm]
		BOC	EOC		BOC	EOC	
Se-79	Se_4Zr_5	-2.74	-2.69	+0.07	-0.10	-0.10	+101
Zr-93	Zr (metal)	-2.60	-2.58	+0.10	-0.10	-0.10	+94
Tc-99	Tc (metal)	-3.00	-2.93	+0.08	-0.09	-0.10	+112
Pd-107	Pd (metal)	-2.99	-2.93	+0.08	-0.10	-0.10	+111
Sn-126	SnO_2	-2.44	-2.43	+0.11	-0.11	-0.11	+87
I-129	CeI_3	-2.73	-2.68	+0.08	-0.10	-0.10	+100
	NaI	-2.69	-2.65	+0.08	-0.10	-0.10	+98
Cs-135	CsCl	-2.77	-2.73	+0.08	-0.10	-0.10	+101

※Pu富化度はLLFP装荷前の値に固定