

JAERI-M
83-188

高速炉系における代替構造材核種の
核特性実験に関する予備解析

1983年11月

大杉 俊隆・吉田 弘幸

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力広済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行　日本原子力研究所
印 刷　日立高速印刷株式会社

高速炉系における代替構造材核種の核特性実験に関する予備解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

大杉 俊隆・吉田 弘幸

(1983年10月14日受理)

Na の共鳴領域 (2.3 KeV) 近傍において比較的大きな共鳴断面積を有する核種を構造材として用い、Na 共鳴領域以下のエネルギーへの中性子減速を阻止し、Na 裂失による中性子スペクトル硬化の程度を緩和することによって正の Na ボイド反応度効果を低減化できる可能性がある。これらの共鳴断面積を有する核種としては、V, Ni, Ti, Mo, Nb, Cu, Mn 等がある。

一方 AISI 316 に基くオーストナイト系不銹鋼に代る構造材として、フェライト系不銹鋼あるいは Ni をベースにした合金の開発が進められている。これらの改良合金は添加物として Mo, Ti, V あるいは Nb を含んでいる。

本論文では、(1)不銹鋼 (AISI 316) の代りに代替構造材核種を燃料ピン被覆管、燃料集合体ラッパ管に使用した場合の大型高速炉の臨界性、燃焼特性、増殖性、Na ボイド反応度効果に与える影響を検討し；(2)大型高速炉の部分的模擬体系 FCA XI-1 集合体における代替構造材核種の核特性測定の可能性を Na ボイド反応度効果を中心として検討した。

上記の核種の中では、V, Ti, Ni は臨界性、増殖性、Na ボイド反応度効果の観点から不銹鋼と匹敵するかあるいはよりすぐれた構造材であることを示した。同時に、これらの特性は解析に使用した核データの精度に依存するので、構造材の炉物理特性を明確にする積分実験は、上述のすぐれた特性を検証し、かつ、核断面積データを評価するための有用な積分実験となりうることを指摘した。

Preliminary Analysis of Nuclear Characteristics Experiments in
Fast Reactors for Alternative Structural Materials

Toshitaka OSUGI and Hiroyuki YOSHIDA

Department of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 14, 1983)

In order to reduce the sodium void reactivity worth by alleviating the spectral hardening, some materials, e.g. V, Ni, Ti, Mo, Nb, Cu and Mn, which have resonance cross-sections in the region of sodium's giant resonance (2.3 keV) could be used as structural materials for a fast breeder reactor core. On the other hand, ferritic steels and Ni-base steels which are modified by Mo, Ti, V, or Nb are being investigated as the alternative structural materials with the present austenitic stainless steels (AISI 316). The present paper examined ; (1) the effects of the alternative structural materials on the nuclear characteristics of a large fast breeder reactor, i.e. criticality, burn-up, breeding and sodium void reactivity worth ; (2) the nuclear characteristics (mainly the sodium void reactivity worth) which could be measured in FCA XI-1 Assembly, a partial mock-up system of the large fast breeder reactor, by loading the alternative structural materials into the assembly.

The analyses showed that V, Ti and Ni could be the preferable structural materials from the point of view of the nuclear characteristics. e.g. criticality, breeding and sodium void reactivity worth. In addition, it was pointed out that the integral experiments which would make clear the nuclear characteristics of the structural materials were necessary not only to verify the excellant nuclear property mentioned above but also to evaluate their nuclear cross-section data.

Keywords : FCA XI-1 Assembly, Alternative Structural Material,
Sodium Void Reactivity Worth, Fast Breeder Reactor,
Criticality, Burn-up, Breeding, Partial Mock-up Experiment,
Integral Experiment, Preliminary Analysis

目 次

1. 緒 言	1
2. 代替構造材核種の断面積データ	3
3. 代替構造材を用いた高速炉の核特性	20
3.1 計算モデル	20
3.2 臨界性	21
3.3 増殖性	21
3.4 Naボイド反応度効果	22
3.5 スペクトルインデックスと出力分布	23
4. FCA XI - 1 集合体での代替構造材積分実験の予備解析	43
4.1 FCA XI - 1 集合体の概要と解析モデル	43
4.2 臨界性に関する考察	44
4.3 スペクトルインデックスに関する考察	44
4.4 Naボイド反応度効果に関する考察	45
4.5 実験体系選定と実験項目	46
5. 結 言	60
謝 辞	60
参考文献	61

Contents

1.	Introduction	1
2.	Nuclear Cross-Section Data of Alternative Structural Materials	3
3.	Nuclear Characteristics of Fast Reactor with Use of Structural Materials	20
3.1	Calculational Model	20
3.2	Criticality	21
3.3	Breeding	21
3.4	Sodium Void Reactivity Worth	22
3.5	Neutron Energy Spectrum and Power Distribution	23
4.	Preliminary Analysis of Integral Experiment of Alternative Structural Materials in FCA XI-1 Assembly	43
4.1	Description of FCA XI-1 Assembly and Calculational Model	43
4.2	Discussion on Criticality	44
4.3	Discussion on Spectrum Index	44
4.4	Discussion on Sodium Void Reactivity Worth	45
4.5	Determination of Experimental System and Selection of Items of Measurement	46
5.	Conclusion	60
	Acknowledgement	60
	References	61

1. 緒 言

古くから高速炉の安全性に関する重要な炉物理因子として、Na ボイド反応度効果とドップラー反応度効果が挙げられている。現在でも、特に Na ボイド反応度効果の低減化を意図する非均質炉心高速炉の概念設計では、前者の正の効果と後者の負の効果を考慮した実効的な効果が +1 ドルを超えないことを炉心設計の基本条件の 1 つとして考慮している。したがって、特に正の Na ボイド反応度効果の低減化は現在でも高速炉の重要課題の 1 つであると考えることができる。

本論文では、不銹鋼に代る代替物質を高速炉炉心の構造材および被覆管材に用いることによる Na ボイド反応度効果の低減化可能性を検討すると共に、大型炉心高速炉の部分模擬体系である FCA XI 集合体シリーズによる実験的検証の可能性を予備解析によって検討した。

良く知られているように、Na ボイド反応度効果は正の中性子スペクトル効果と負の中性子漏洩効果の競合によって定まり、一般的には炉心の大型化に伴ない前者の正の効果が大きくなり全体として Na ボイド反応度効果は正になる。中性子スペクトル効果は Na の体系からの喪失に伴なう中性子スペクトル硬化による効果である。すなわち、体系からの Na 喪失により中性子の非弾性、弾性散乱が減少し、中性子スペクトルは硬化する。この結果、核分裂性物質の α (σ_c / σ_f) 値は減少し、親物質のしきい核分裂は増加し、構造材核種の中性子吸収は減少し、結果として Na 喪失によって実効的な η ($\nu \tilde{\Sigma}_f / \tilde{\Sigma}_a$) 値は増加する。これが中性子スペクトル効果が正の反応度効果となる基本的なメカニズムである。一方、中性子漏洩効果は、体系からの Na 喪失に伴なう中性子漏洩增加による負の効果である。したがって、正の Na ボイド反応度効果の低減化は、原理的に、正の中性子スペクトル効果の減少、あるいは負の中性子漏洩効果の増加によって達成できる。不銹鋼に代る代替構造材を用いることは前者、非均質炉心を用いることは後者によって、それぞれ正の Na ボイド反応度効果低減化を図るものである。

Na ボイド反応度効果の中性子スペクトル効果では、特に大型炉心高速炉では、Na 喪失時に 2.3 KeV 近傍にある Na の大きな共鳴弾性散乱断面積の喪失による中性子スペクトル硬化の寄与が大きく、重要である。代替構造材核種はこの Na 共鳴領域において比較的大きな共鳴断面積を有する核種である。すなわち、これらの核種は Na 共鳴領域以下のエネルギーへの中性子減速を阻止し、Na 喪失による中性子スペクトル硬化の程度を緩和することによって正の Na ボイド反応度効果の低減化を可能にする。この性質を有する構造材核種には、V, Ni, Ti, Mo, Nb, Cu, Mn などがある。

現在の高速炉に用いられている炉心構造材は、被覆管材を含めて AISI 316 に基くオーストナイト系不銹鋼であるが、一般的にスウェーリング特性、クリープ特性に劣り、改良合金の研究が世界的に進められている。米国においては、AISI 316 に基く改良合金を第 1 世代、フェライト系不銹鋼による特性改良を第 2 世代、Ni 基合金による耐熱改良を第 3 世代として、高速炉構造材合金の開発研究を進めている。それによると、上述の Na ボイド反応度効果低減化の可能性を有する構造材核種の内、Ni を除くその他の核種は添加物としてのみ考えられているが、

V, Ti はすぐれた耐熱金属であるので構造材の基金属としての潜在性は有していると考える。

上述の核種に関する高速臨界実験装置による積分実験は、行なわれているとしてもサンプル反応度価値程度であり、そのデータの核データ評価への寄与は非常に低くい。したがって、これらの核種を多く含む体系を模擬した集合体での実験は、Na ポイド反応度効果低減化の可能性を検討する以外にも、臨界性、スペクトルインデック、燃料を含む種々のサンプル反応度価値などの測定を通じた構造材核種の核データ評価に資する総合的な積分実験となりうる。

第 2 章では、Na の中性子断面積との比較において代替構造材核種の中性子断面積の特徴を概説し、第 3 章では、不銹鋼 (AISI 316) の代りに代替構造材核種を燃料ピン被覆管、燃料集合体ラッパ管に使用した場合の大型炉心高速炉の臨界性、燃焼特性、増殖性、Na ポイド反応度効果に与える影響を検討する。第 4 章では、大型炉心高速炉の炉心組成を中心のテスト領域に模擬した部分模擬体系 FCA XI 集合体における代替構造材核種の核特性測定の可能性を、Na ポイド反応度効果を中心として検討する。

2. 代替構造材核種の断面積データ

本章では、不銹鋼に代る代替構造材としてどのような合金が考えられているかを、米国を例に採って概観し、本論文にて検討の対象とすべき構造材核種を選択する（第2.1節）。第2.2節では、選択された各構造材核種の中性子断面積について、体系の臨界性に影響の大きい中性子吸收断面積と、スペクトル形成に重要な役割を果たす弾性除去断面積を中心に略述する。

2.1 代替構造材開発計画

米国では⁽¹⁾被覆管材を含む構造材の開発計画が1974年に開始され、現在の高速炉用構造材として主流である AISI 316 を含めて 7 種類の合金が開発候補として選定された（合金の組成を Table 2.1 に示す）。これらの合金のうち、Mo を添加した改良合金 AISI 316 不銹鋼は第1世代の構造材とされ、主としてクリンチリバー高速炉の設計データを得るために機械的及び照射特性の測定が行なわれており、Fast Test Reactor を用いての照射実験が1984年まで計画されている。Fig. 2.1, Fig. 2.2 に見られるように、AISI 316 不銹鋼はスウェーリング、クリープ特性に劣るのが難点とされており、これらの改善のため第2世代として 2 種類の改良合金が開発の途上にある。1つは、オーステナイト系不銹鋼である AISI 316 にチタン (Ti) を添加した D 9、他はフェライト系不銹鋼 HT - 9 である。HT - 9 には、モリブデン (Mo) の他、バナジウム (V), タングステン (W) が添加されている。さらに、耐熱特性の改善のため、第3世代の合金として、フェライト系不銹鋼 D 57 及びニッケル (Ni) をベースとして 3 種類の合金 D 21, D 66, D 68 が開発目標として挙げられている。

上記及び Table 2.1 に見る如く、将来の構造材合金としては、鉄、ニッケル、クロム (Cr) を基金属とし、添加物としては、モリブデン (Mo), チタン (Ti), バナジウム (V), タングステン (W), ニオブ (Nb), アルミニウム (Al), ジルコニウム (Zr), ポロン (B), ハフニン (Hf) 等が考えられている。

本論文では、上記の核種の内、Ni, Mo, Ti, V, Nb を選び、さらに、2.3 KeV 近傍に大きな中性子吸收あるいは弾性除去断面積を持つ核種として、Mn, Cu を追加して検討すべき核種とした。

2.2 代替構造材核種の断面積データ

本論文にて検討した構造材核種 V, Ni, Ti, Mo, Nb, Cu, Mn の中性子反応断面積を Fe, Cr, Na と共に Table 2.2 に示す。断面積は JFS-V 2-25 G⁽²⁾ から採ったが、V, Nb, Ti については、PROF-GROUCH-G II R システム⁽³⁾ を用いて ENDF/B-N 处理して作成した。25 群のエネルギー群構造を Table 2.3 に示す。

体系のスペクトル形成に大きな役割を果たす弾性除去断面積 σ_{er} (非弾性散乱断面積につい

ては各構造材核種共ほぼ等しく、①MeV 以上のエネルギーに対してのみ有意な値 1.0 ~ 1.5 barn を持つ) 及び、臨界性に影響を与える吸収断面積 σ_e について以下略述する。

Na σ_{er} : 第 13 群 (2.15 ~ 4.65 KeV) にピーク 4.0 barn を持ち Na ボイド反応度効果に重要な役割を果たす。他の群では第 12 群 (4.65 ~ 10 KeV) が比較的大きく 1.3 barn である他は 0.4 barn 程度である。

σ_e : 第 1 群 (6.5 ~ 10.5 MeV), 第 13 群がそれぞれ 0.07, 0.11 barn の他は小さい。16 群 (215 ~ 465 KeV) 以下のエネルギーでは $1/v$ 法則に従う。

Fe σ_{er} : 特に顕著なピークは無い。第 13 群以上で 0.2 barn, 14 群以下で 0.5 barn 程度である。

σ_e : 第 1 群で 0.08 barn, 第 14 群 (1.0 ~ 2.15 KeV) で 0.17 barn である他は 0.03 barn 以下である。第 15 群以下では $1/v$ 法則に従う。

Cr σ_{er} : 第 8 群 (100 ~ 200 KeV), 第 12 群でそれぞれ 0.87, 1.31 barn の小さなピークを持つ他は 0.2 barn 程度である。

σ_e : 第 14 群で 0.15 barn である他は Fe より多少大きい程度である。第 15 群以下では $1/v$ 法則に従う。

Ni σ_{er} : 第 12 群に 1.4 barn の小さなピークを持つ他は Fe と同程度の大きさである。 σ_e : 第 1, 2, 3 群で 0.55 ~ 0.15 barn である他は Fe と同程度である。第 14 群以下では $1/v$ 法則に従う。

V σ_{er} : 第 10, 11, 12 群でそれぞれ 2.0, 3.8, 5.4 barn と大きな値を持つ。他の群では 0.2 barn 程度である。

σ_e : 全体的に $1/v$ 法則に近く Fe と同程度である。

Ti σ_{er} : 第 10, 11 群にそれぞれ 3.0, 1.6 barn のピークを持つ。他の群では 0.2 barn 程度である。

σ_e : 全体的に $1/v$ 法則に近く Fe と同程度である。

Mo σ_{er} : 第 15 群に 2.0 barn のピークがある他は 0.2 barn 程度である。 σ_e : 第 10 群 (21.5 ~ 46.5 KeV) 以下のエネルギーでは Fe の 10 倍以上の大きな値を持つ、第 19 群 (21.5 ~ 46.5 KeV) では 21.4 barn に達する。

Nb σ_{er} : 第 14 群に 0.7 barn の小さなピークがある他は 0.2 barn 程度である。

σ_e : 第 10 群 ~ 第 17 群で Mo と同程度の吸収断面積を持つ。

Mn σ_{er} : 第 13 群, 第 14 群, 第 15 群でそれぞれ 20 barn, 2.5 barn, 1.7 barn と大きな値を持つ。

σ_e : 第 10 群以下のエネルギーで Fe の 5 倍程度の値を持つ他、第 16 群で約 10 barn の大きなピークを持つ。

Cu σ_{er} : 顕著なピークは無く 0.2 ~ 0.3 barn 程度である。

σ_e : 第 15 群に 2.2 barn のピークを持つ他は小さい。第 17 群以下は $1/v$ 法則に従う。

Fig. 2.3, 2.4 に各構造材核種のそれぞれ弹性除去断面積、中性子吸収断面積を、鉄、ナトリウムの値と比較して示す。但し、弹性除去断面積の場合鉄、ナトリウム以外の核種の断面積は、ピーク等の特徴的なもののみに限って示した。

Table 2.1 Nominal Alloy Compositions
(Ref. 1)

	Iron	Nickel	Chromium	Others ^a
316CW	Balance	12.0	17.0	Mo
D9	Balance	14.5	14.5	Mo,Ti
HT-9	Balance	0.5	12.0	Mo,V,W
D57	Balance	0.5	10.5	Mo,V,Nb
D21	Balance	25.0	8.5	Mo,Ti,Al,Zr,B
D66	Balance	40.0	10.5	Mo,Ti,Al,Zr,Nb
D68	Balance	35.0	12.0	Ti,Al,Zr,Nb, Hf,B

^aAll alloys contain controlled additions of silicon, manganese, and carbon.

Table 2.3 Energy Structure and Fission Spectrum of JFS-V2-25G Set

Group	Upper energy	Lower energy	DU	Pu-239 CHI (I)	U-235 CHI (I)
1	10.5 (MeV)	6.5 (MeV)	0.4800	0.023372	0.019000
2	6.5 (MeV)	4.0 (MeV)	0.4800	0.099585	0.089549
3	4.0 (MeV)	2.5 (MeV)	0.4800	0.184727	0.177317
4	2.5 (MeV)	1.4 (MeV)	0.5700	0.261464	0.262604
5	1.4 (MeV)	0.8 (MeV)	0.5700	0.195521	0.202274
6	0.8 (MeV)	0.4 (MeV)	0.6900	0.137327	0.144635
7	0.4 (MeV)	0.2 (MeV)	0.6900	0.060323	0.064229
8	0.2 (MeV)	100 (keV)	0.6900	0.023788	0.025468
9	100 (keV)	46.5 (keV)	0.7700	0.009395	0.010087
10	46.5 (keV)	21.5 (keV)	0.7700	0.003078	0.003310
11	21.5 (keV)	10.0 (keV)	0.7700	0.000977	0.001051
12	10.0 (keV)	4.65 (keV)	0.7700	0.000312	0.000336
13	4.65 (keV)	2.15 (keV)	0.7700	0.000100	0.000107
14	2.15 (keV)	1000 (ev)	0.7700	0.000031	0.000034
15	1000 (ev)	465 (ev)	0.7700		
16	465 (ev)	215 (ev)	0.7700		
17	215 (ev)	100 (ev)	0.7700		
18	100 (ev)	46.5 (ev)	0.7700		
19	46.5 (ev)	21.5 (ev)	0.7700		
20	21.5 (ev)	10.0 (ev)	0.7700		
21	10.0 (ev)	4.65 (ev)	0.7700		
22	4.65 (ev)	2.15 (ev)	0.7700		
23	2.15 (ev)	1.0 (ev)	0.7700		
24	1.0 (ev)	0.465 (ev)	0.7700		
25	0.465 (ev)	0.215 (ev)	0.7700		

Table 2.2-1 Infinite dilution cross section of V

GROUP	TOTAL	CAPTURE	INELASTIC	ELASTIC	ELA REMOVAL (N/2N)
1	3.23087E+00	2.32656E-02	1.40380E+00	1.80380E+00	8.81071E-02
2	3.70193E+00	6.05345E-03	1.50584E+00	2.19004E+00	9.84535E-02
3	3.87183E+00	8.22636E-04	1.45976E+00	2.41124E+00	1.46411E-01
4	3.34875E+00	1.21694E-03	7.31347E-01	2.61619E+00	1.38206E-01
5	3.24296E+00	1.53406E-03	4.21725E-01	2.81970E+00	1.37629E-01
6	3.23881E+00	1.99454E-03	2.75190E-01	2.96163E+00	1.37629E-01
7	4.44164E+00	4.08176E-03	4.25446E-02	4.39501E+00	3.19221E-01
8	5.94729E+00	5.81210E-03	0.0	5.94148E+00	7.34329E-02
9	7.31578E+00	6.98047E-03	0.0	7.30880E+00	1.75151E-01
10	1.11483E+01	1.43501E-02	0.0	1.11339E+01	1.96268E+00
11	5.95840E+01	2.88038E-02	0.0	5.95552E+01	3.82306E+00
12	7.66842E+01	5.65572E-02	0.0	7.66277E+01	5.36702E+00
13	7.70635E+01	1.28783E-01	0.0	7.69347E+01	4.60342E-01
14	8.11949E+00	2.96834E-02	0.0	8.08981E+00	3.46833E-01
15	6.30658E+00	3.42821E-02	0.0	6.27230E+00	3.10193E-01
16	5.93996E+00	4.78880E-02	0.0	5.89207E+00	2.82391E-01
17	6.62850E+00	1.81697E-01	0.0	6.44681E+00	2.83424E-01
18	5.39642E+00	1.00385E-01	0.0	5.29604E+00	2.60231E-01
19	5.15325E+00	1.45025E-01	0.0	5.00823E+00	2.53328E-01
20	5.21191E+00	2.11915E-01	0.0	5.00000E+00	2.55294E-01
21	5.31009E+00	3.10094E-01	0.0	5.00000E+00	2.55208E-01
22	5.45543E+00	4.55435E-01	0.0	5.00000E+00	2.53326E-01
23	5.66867E+00	6.68727E-01	0.0	4.99994E+00	2.55296E-01
24	5.98061E+00	9.80609E-01	0.0	5.00000E+00	2.55208E-01
25	6.44020E+00	1.44020E+00	0.0	5.00000E+00	2.53325E-01

Table 2.2-2 Infinite dilution cross section of Ni

GROUP	TOTAL	CAPTURE	INELASTIC	ELASTIC	ELA REMOVAL (N,2N)
1	3.55280E+00	5.53228E-01	9.17583E-01	2.08199E+00	6.77639E-02
2	3.62772E+00	3.44476E-01	1.19744E+00	2.08580E+00	7.73430E-02
3	3.28121E+00	1.46756E-01	1.07898E+00	2.05548E+00	1.16891E-01
4	3.00007E+00	3.28943E-02	4.91329E-01	2.47585E+00	1.28249E-01
5	2.92607E+00	9.64580E-03	5.60990E-03	2.91081E+00	1.54687E-01
6	3.38082E+00	7.67173E-03	0.0	3.37315E+00	1.08112E-01
7	5.67082E+00	8.77070E-03	0.0	5.66205E+00	3.23307E-01
8	5.76865E+00	1.43762E-02	0.0	5.75427E+00	1.62339E-01
9	7.70499E+00	2.04370E-02	0.0	7.68455E+00	2.44125E-01
10	1.12130E+01	3.60587E-02	0.0	1.11770E+01	7.28048E-01
11	4.41949E+01	9.67110E-02	0.0	4.40981E+01	4.98691E-01
12	1.51352E+01	2.82771E-02	0.0	1.51069E+01	1.43289E+00
13	2.05432E+01	4.44407E-02	0.0	2.04988E+01	6.94906E-01
14	1.61216E+01	2.25685E-02	0.0	1.60990E+01	7.33119E-01
15	1.69319E+01	2.93327E-02	0.0	1.69026E+01	7.62969E-01
16	1.74398E+01	4.19759E-02	0.0	1.73978E+01	7.72952E-01
17	1.77055E+01	6.10474E-02	0.0	1.76445E+01	7.86458E-01
18	1.78506E+01	8.91382E-02	0.0	1.77614E+01	7.89750E-01
19	1.79472E+01	1.30629E-01	0.0	1.78166E+01	7.85597E-01
20	1.80340E+01	1.91577E-01	0.0	1.78425E+01	7.92458E-01
21	1.81352E+01	2.80959E-01	0.0	1.78543E+01	7.92556E-01
22	1.82725E+01	4.12632E-01	0.0	1.78599E+01	7.86887E-01
23	1.84680E+01	6.05362E-01	0.0	1.78627E+01	7.93052E-01
24	1.87516E+01	8.88095E-01	0.0	1.78636E+01	7.92833E-01
25	1.91682E+01	1.30401E+00	0.0	1.78642E+01	7.87006E-01

Table 2.2-3 Infinite dilution cross section of Ti

GROUP	TOTAL	CAPTURE	INELASTIC	ELASTIC	ELA REMOVAL (N, 2N)
1	3.09030E+00	1.77115E-02	1.41656E+00	1.65603E+00	9.54723E-02 0.0
2	3.49444E+00	1.65719E-03	1.38495E+00	2.10783E+00	1.15070E-01 0.0
3	3.57926E+00	2.11737E-03	1.01769E+00	2.55945E+00	1.67324E-01 0.0
4	3.22118E+00	2.73852E-03	6.44077E-01	2.57437E+00	1.64156E-01 0.0
5	3.01005E+00	3.29338E-03	2.05125E-01	2.80163E+00	1.56158E-01 0.0
6	2.77585E+00	4.20760E-03	2.18052E-02	2.74984E+00	9.48677E-02 0.0
7	2.34312E+00	4.95061E-03	3.12553E-03	2.33505E+00	1.62393E-01 0.0
8	2.08522E+00	5.36976E-03	0.0	2.07985E+00	1.62188E-01 0.0
9	8.64751E+00	6.36316E-03	0.0	8.64114E+00	1.95337E-01 0.0
10	2.46105E+01	2.18518E-02	0.0	2.45887E+01	2.95039E+00 0.0
11	7.01680E+01	6.58921E-02	0.0	7.01021E+01	1.59187E+00 0.0
12	1.41643E+01	5.48797E-02	0.0	1.41094E+01	4.63809E-01 0.0
13	1.16320E+01	4.88262E-02	0.0	1.15831E+01	2.72420E-01 0.0
14	4.54039E+00	2.82644E-02	0.0	4.51213E+00	2.41576E-01 0.0
15	4.43746E+00	3.74624E-02	0.0	4.40000E+00	2.41127E-01 0.0
16	4.45559E+00	5.55915E-02	0.0	4.40000E+00	2.39352E-01 0.0
17	4.48097E+00	8.09699E-02	0.0	4.40000E+00	2.41208E-01 0.0
18	4.51824E+00	1.18244E-01	0.0	4.40000E+00	2.41125E-01 0.0
19	4.57367E+00	1.73667E-01	0.0	4.40000E+00	2.39352E-01 0.0
20	4.65503E+00	2.55028E-01	0.0	4.40000E+00	2.41204E-01 0.0
21	4.77400E+00	3.74006E-01	0.0	4.40000E+00	2.41128E-01 0.0
22	4.94932E+00	5.49319E-01	0.0	4.40000E+00	2.39349E-01 0.0
23	5.20666E+00	8.06666E-01	0.0	4.40000E+00	2.41208E-01 0.0
24	5.58244E+00	1.18244E+00	0.0	4.40000E+00	2.41128E-01 0.0
25	6.13667E+00	1.73667E+00	0.0	4.40000E+00	2.39349E-01 0.0

Table 2.2-4 Infinite dilution cross section of Mo

GROUP	CAPTURE	INELASTIC	(N, 2N)	
			ELASTIC	ELA REMOVAL
1	4.14558E+00	1.87159E+00	2.27028E+00	6.19293E-02
1	3.72067E-03	1.89374E+00	1.92238E+00	5.60569E-02
2	6.21264E-03	1.88800E+00	2.21866E+00	7.06822E-02
3	9.72292E-03	1.66293E+00	3.40096E+00	9.35750E-02
4	1.61927E-02	7.33332E-01	5.47375E+00	1.60451E-01
5	2.80849E-02	1.69189E-01	7.60913E+00	1.98126E-01
6	4.44581E-02	1.87471E-02	8.56156E+00	2.36432E-01
7	5.54297E-02	0.0	8.90989E+00	2.56068E-01
8	6.78861E-02	0.0	8.35745E+00	2.23882E-01
9	8.76638E-02	0.0	8.11984E+00	2.18692E-01
10	1.61244E-01	0.0	8.16714E+00	2.26596E-01
11	2.95200E-01	0.0	8.63828E+00	2.46739E-01
12	4.76838E-01	0.0	9.67684E+00	2.81081E-01
13	6.96023E-01	0.0	1.14431E+01	3.42215E-01
14	9.59865E-01	0.0	1.03711E+01	2.04427E+00
15	1.96456E+00	0.0	8.35123E+00	1.44989E-01
16	1.89567E+00	0.0	1.25951E+01	1.37621E-01
17	6.09547E+00	0.0	6.58578E+00	5.21386E-01
18	1.54121E+00	0.0	2.55484E+01	1.31439E-01
19	2.13840E+01	0.0	4.92094E+00	1.35091E-01
20	1.19844E+00	0.0	4.97073E+00	1.35892E-01
21	1.37722E+00	0.0	4.99628E+00	1.35340E-01
22	2.39694E-01	0.0	5.00000E+00	1.36390E-01
23	3.50222E-01	0.0	5.00000E+00	1.363346E-01
24	5.13561E+00	0.0	5.00000E+00	1.35342E-01
25	7.54262E-01	0.0	5.00000E+00	0.0

Table 2.2-5 Infinite dilution cross section of Nb

GROUP	TOTAL	CAPTURE		INELASTIC		ELASTIC		ELA REMOVAL		(N, 2N)	
		ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL
1	4.17432E+00	1.69436E-02	1.64273E+00	2.51464E+00	8.36372E-02	1.95141E-02	0.0	5.63485E-03	1.86460E+00	1.91363E+00	5.53913E-02
2	3.78387E+00	5.63485E-03	1.86460E+00	2.08867E+00	1.91596E+00	5.45263E-02	0.0	4.00956E+00	1.06209E-02	2.01952E+00	6.73370E-02
3	4.00956E+00	4.93215E-03	1.06209E-02	8.74166E-01	5.40998E+00	1.57899E-01	0.0	4.94661E+00	3.15054E-02	8.17481E-02	7.96333E+00
4	4.94661E+00	1.06209E-02	3.15054E-02	4.18998E-02	7.96333E+00	2.04939E-01	0.0	6.31565E+00	8.05698E+00	6.17481E-02	4.18998E-02
5	6.31565E+00	8.05698E+00	6.17481E-02	1.58186E-02	9.21829E+00	2.48381E-01	0.0	9.30067E+00	9.35755E+00	6.96333E-03	9.25968E+00
6	9.30067E+00	9.35755E+00	6.96333E-03	8.18239E-04	6.38956E+00	2.66456E-01	0.0	6.53228E+00	1.41902E-01	2.24508E-01	1.75861E-01
7	9.30067E+00	9.35755E+00	1.41902E-01	8.83413E-05	6.48595E+00	1.80745E-01	0.0	6.71055E+00	6.71055E+00	3.68635E-01	6.56957E+00
8	6.53228E+00	6.71055E+00	3.68635E-01	0.0	7.93255E+00	1.83578E-01	0.0	6.93821E+00	6.93821E+00	6.89019E-01	7.93255E+00
9	6.93821E+00	8.62156E+00	6.89019E-01	0.0	9.30065E+00	2.25121E-01	0.0	8.62156E+00	1.04642E+01	1.16350E+00	9.57304E+00
10	8.62156E+00	1.04642E+01	1.16350E+00	0.0	7.05592E-01	0.0	0.0	1.17637E+01	2.19061E+00	2.19061E+00	7.05592E-01
11	1.04642E+01	1.17637E+01	2.19061E+00	0.0	1.61863E-01	0.0	0.0	8.02141E+00	1.26549E+00	1.26549E+00	6.75591E+00
12	1.17637E+01	2.19061E+00	1.26549E+00	0.0	6.34980E+00	1.62164E-01	0.0	8.31041E+00	1.96061E+00	1.96061E+00	6.08468E+00
13	2.19061E+00	8.02141E+00	1.96061E+00	0.0	1.55761E-01	0.0	0.0	9.08833E+00	3.00365E+00	1.32963E-01	5.60799E+00
14	8.02141E+00	8.02141E+00	1.32963E-01	0.0	1.58593E-01	0.0	0.0	5.74096E+00	3.96319E-01	3.96319E-01	5.64404E+00
15	8.02141E+00	8.31041E+00	3.96319E-01	0.0	1.57933E-01	0.0	0.0	5.70467E+00	4.93366E-02	4.93366E-02	5.65533E+00
16	8.31041E+00	9.08833E+00	4.93366E-02	0.0	1.59355E-01	0.0	0.0	5.73155E+00	7.14922E-02	5.66006E+00	1.59391E-01
17	9.08833E+00	5.74096E+00	7.14922E-02	0.0	1.58257E-01	0.0	0.0	5.76674E+00	1.04563E-01	5.66218E+00	1.59503E-01
18	5.74096E+00	6.04036E+00	1.04563E-01	0.0	1.56313E+00	0.0	0.0	5.81639E+00	1.53263E-01	2.24641E-01	5.66337E+00
19	6.04036E+00	6.04036E+00	1.53263E-01	0.0	1.59458E-01	0.0	0.0	5.88821E+00	3.29915E-01	3.29915E-01	5.66337E+00
20	6.04036E+00	5.70467E+00	3.29915E-01	0.0	1.58287E-01	0.0	0.0	5.99369E+00	5.66337E+00	5.66337E+00	1.58287E-01
21	5.70467E+00	5.73155E+00	5.66337E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	5.76674E+00	1.04563E-01	5.66218E+00	1.59503E-01
22	5.76674E+00	5.81639E+00	1.04563E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	5.88821E+00	2.24641E-01	2.24641E-01	5.66337E+00
23	5.81639E+00	5.88821E+00	2.24641E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	5.99369E+00	3.29915E-01	3.29915E-01	5.66337E+00
24	5.99369E+00	5.99369E+00	3.29915E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 2.2-6 Infinite dilution cross section of Cu

GROUP	CAPTURE	INELASTIC		ELA REMOVAL (N,2N)
		ELASTIC	ELASTIC	
1	3.53903E+00	9.24271E-02	1.53383E+00	1.90735E-06
2	3.59827E+00	7.13185E-02	1.5943E+00	7.83119E-02
3	3.23424E+00	4.47935E-02	1.92752E+00	1.25397E-01
4	2.80009E+00	1.73544E-02	1.44920E+00	1.74025E+00
5	3.44102E+00	1.27382E-02	5.80323E-01	2.0241E+00
6	4.28050E+00	1.48987E-02	2.97883E-01	3.13040E+00
7	5.07308E+00	1.59658E-02	9.88335E-03	4.25572E+00
8	5.07763E+00	1.81439E-02	0.0	5.05711E+00
9	6.87392E+00	2.54650E-02	0.0	5.05949E+00
10	8.04858E+00	4.48190E-02	0.0	6.84846E+00
11	9.62466E+00	7.32979E-02	0.0	8.00376E+00
12	1.31720E+01	1.58059E-01	0.0	9.55136E+00
13	1.50236E+01	2.10568E-01	0.0	1.30139E+01
14	1.77217E+01	1.54987E-01	0.0	1.48130E+01
15	1.25619E+01	2.15655E+00	0.0	1.75667E+01
16	7.17085E+00	2.91484E-01	0.0	1.04053E+01
17	7.06034E+00	2.28946E-02	0.0	6.87937E+00
18	7.22092E+00	4.00450E-02	0.0	7.03745E+00
19	7.34705E+00	7.55808E-02	0.0	7.18088E+00
20	7.45885E+00	1.31138E-01	0.0	7.27147E+00
21	7.57131E+00	2.10707E-01	0.0	7.32271E+00
22	7.70281E+00	3.25791E-01	0.0	7.36060E+00
23	7.87542E+00	4.90541E-01	0.0	7.37702E+00
24	8.11437E+00	7.25517E-01	0.0	7.38488E+00
25	8.46451E+00	1.07436E+00	0.0	7.38885E+00
				7.39015E+00
				0.0

Table 2.2-7 Infinite dilution cross section of Mn

GROUP	TOTAL	CAPTURE		ELASTIC		ELA REMOVAL	
		INELASTIC	ELASTIC	INELASTIC	ELASTIC	INELASTIC	ELASTIC
1	3.43452E+00	3.07354E-02	1.65701E+00	1.74678E+00	7.65544E-02	0.0	0.0
2	3.69395E+00	8.29732E-03	1.65271E+00	2.03295E+00	8.88332E-02	0.0	0.0
3	3.69827E+00	1.61081E-03	1.42395E+00	2.27271E+00	1.10476E-01	0.0	0.0
4	3.51659E+00	2.00757E-03	1.00707E+00	2.50751E+00	1.22154E-01	0.0	0.0
5	3.32447E+00	2.73068E-03	7.34969E-01	2.58677E+00	1.24482E-01	0.0	0.0
6	3.43750E+00	3.95384E-03	5.81376E-01	2.85217E+00	1.64562E-01	0.0	0.0
7	4.07623E+00	7.23637E-03	4.63551E-01	3.60544E+00	3.73446E-01	0.0	0.0
8	6.63760E+00	1.45640E-02	1.99874E-01	6.42316E+00	2.40325E-01	0.0	0.0
9	7.50336E+00	2.50764E-02	0.0	7.47828E+00	2.19420E-01	0.0	0.0
10	1.41584E+01	4.93632E-02	0.0	1.41090E+01	8.65132E-01	0.0	0.0
11	8.45290E+00	8.10119E-02	0.0	8.37189E+00	6.02003E-01	0.0	0.0
12	3.522968E+01	5.52224E-02	0.0	3.52416E+01	3.53708E-01	0.0	0.0
13	1.67086E+02	2.01054E-01	0.0	1.66885E+02	2.00136E+01	0.0	0.0
14	8.54351E+01	1.39722E+00	0.0	8.40379E+01	2.51352E+00	0.0	0.0
15	1.96973E+01	1.75089E-01	0.0	1.95222E+01	1.65380E+00	0.0	0.0
16	4.33477E+02	9.86542E+00	0.0	4.23611E+02	1.07964E+00	0.0	0.0
17	9.10696E+00	5.08490E-01	0.0	8.59847E+00	2.03440E-01	0.0	0.0
18	3.53942E+00	3.75462E-01	0.0	3.16396E+00	1.21400E-01	0.0	0.0
19	2.72035E+00	4.43973E-01	0.0	2.27638E+00	9.85391E-02	0.0	0.0
20	2.57508E+00	5.97794E-01	0.0	1.97728E+00	8.97084E-02	0.0	0.0
21	2.69261E+00	8.44855E-01	0.0	1.84776E+00	8.61073E-02	0.0	0.0
22	3.01821E+00	1.21929E+00	0.0	1.79892E+00	8.39607E-02	0.0	0.0
23	3.55141E+00	1.77592E+00	0.0	1.77549E+00	8.37847E-02	0.0	0.0
24	4.35870E+00	2.59488E+00	0.0	1.76382E+00	8.34241E-02	0.0	0.0
25	5.56420E+00	3.80502E+00	0.0	1.75918E+00	8.26644E-02	0.0	0.0

Table 2.2-8 Infinite dilution cross section of Fe

GROUP	TOTAL	CAPTURE		INELASTIC		ELASTIC		ELA REMOVAL		(N,2N)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3.49345E+00	7.86373E-02	2.76956E-02	9.59428E-03	1.12593E+00	8.02006E-01	3.42566E-01	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3.68637E+00	1.50283E+00	1.55855E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
3	3.45150E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
4	3.07014E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
5	2.67218E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
6	3.35709E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
7	3.33772E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
8	4.15275E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
9	5.34562E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
10	1.37957E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
11	2.80140E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
12	1.01074E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
13	6.81640E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
14	8.92209E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
15	9.90273E+00	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
16	1.09715E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
17	1.13712E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
18	1.14489E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
19	1.14729E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
20	1.15070E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
21	1.15569E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
22	1.16304E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
23	1.17338E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
24	1.18961E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01
25	1.21287E+01	1.45265E+00	1.50283E+00	2.58756E-03	2.96128E-03	5.01883E-03	5.33772E+00	5.72054E-03	5.88631E-03	8.95499E-03	1.01074E+01

Table 2.2-9 Infinite dilution cross section of Cr

GROUP	TOTAL	CAPTURE		INELASTIC		ELASTIC		ELA REMOVAL (N,2N)	
		ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL	ELA	REMOVAL
1	3.34539E+00	4.02161E-02	1.37114E+00	1.93404E+00	8.51470E-02	8.51470E-02	5.94616E-03		
2	3.73178E+00	7.92669E-03	1.37807E+00	2.34578E+00	1.22647E-01	1.22647E-01	0.0		
3	3.72075E+00	3.84530E-03	1.04477E+00	2.67213E+00	1.49399E-01	1.49399E-01	0.0		
4	3.39354E+00	4.38948E-03	6.46418E-01	2.74274E+00	1.81649E-01	1.81649E-01	0.0		
5	3.10519E+00	7.36014E-03	7.68386E-02	3.02099E+00	1.80678E-01	1.80678E-01	0.0		
6	3.45824E+00	4.63029E-03	1.54249E-03	3.45207E+00	2.09114E-01	2.09114E-01	0.0		
7	3.31748E+00	3.98044E-03	0.0	3.31350E+00	2.04367E-01	2.04367E-01	0.0		
8	6.93711E+00	7.54967E-03	0.0	6.92295E+00	8.71848E-01	8.71848E-01	0.0		
9	6.58011E+00	1.32156E-02	0.0	6.56689E+00	1.96203E-01	1.96203E-01	0.0		
10	2.92196E+00	3.18948E-02	0.0	2.89007E+00	1.31930E-01	1.31930E-01	0.0		
11	4.32181E+00	2.85249E-02	0.0	4.29329E+00	3.86611E-01	3.86611E-01	0.0		
12	2.34980E+01	7.78474E-02	0.0	2.34202E+01	1.30712E+00	1.30712E+00	0.0		
13	1.66500E+01	3.91231E-02	0.0	1.66109E+01	3.61014E-01	3.61014E-01	0.0		
14	5.83429E+00	1.54439E-01	0.0	5.67986E+00	2.48720E-01	2.48720E-01	0.0		
15	4.72923E+00	2.20162E-02	0.0	4.70721E+00	2.27878E-01	2.27878E-01	0.0		
16	4.50745E+00	2.97403E-02	0.0	4.47771E+00	2.19843E-01	2.19843E-01	0.0		
17	4.44084E+00	4.22027E-02	0.0	4.39863E+00	2.19126E-01	2.19126E-01	0.0		
18	4.42812E+00	6.10300E-02	0.0	4.36709E+00	2.18024E-01	2.18024E-01	0.0		
19	4.44235E+00	8.90520E-02	0.0	4.35330E+00	2.15963E-01	2.15963E-01	0.0		
20	4.47737E+00	1.30270E-01	0.0	4.34710E+00	2.17427E-01	2.17427E-01	0.0		
21	4.53499E+00	1.90682E-01	0.0	4.34431E+00	2.17262E-01	2.17262E-01	0.0		
22	4.62316E+00	2.80152E-01	0.0	4.34301E+00	2.15617E-01	2.15617E-01	0.0		
23	4.75320E+00	4.10743E-01	0.0	4.34246E+00	2.17268E-01	2.17268E-01	0.0		
24	4.94503E+00	6.02898E-01	0.0	4.34213E+00	2.17189E-01	2.17189E-01	0.0		
25	5.22635E+00	8.84385E-01	0.0	4.34197E+00	2.15582E-01	2.15582E-01	0.0		

Table 2.2-10 Infinite dilution cross section of Na

GROUP	TOTAL	CAPTURE	INELASTIC	ELASTIC	ELA REMOVAL (N, 2N)
1	1.66029E+00	7.07647E-02	8.93010E-01	6.96518E-01	1.20848E-01
2	1.93264E+00	7.40387E-03	8.77992E-01	1.04725E+00	1.62403E-01
3	2.31467E+00	1.74959E-04	7.31747E-01	1.58275E+00	2.20651E-01
4	2.75078E+00	1.95108E-04	5.63941E-01	2.18664E+00	2.08743E-01
5	3.65026E+00	2.28450E-04	4.99402E-01	3.15063E+00	3.95445E-01
6	4.35625E+00	3.03655E-04	1.61873E-01	4.19407E+00	4.19339E-01
7	4.01716E+00	6.08742E-04	0.0	4.01655E+00	6.00360E-01
8	3.43071E+00	1.42210E-03	0.0	3.42929E+00	4.30958E-01
9	5.03126E+00	1.96087E-03	0.0	5.02930E+00	7.59438E-01
10	3.85206E+00	1.86794E-03	0.0	3.85019E+00	4.44737E-01
11	4.43528E+00	2.76861E-04	0.0	4.43500E+00	5.49379E-01
12	7.45621E+00	1.62141E-03	0.0	7.45459E+00	1.27334E+00
13	9.87118E+01	1.08777E-01	0.0	9.86030E+01	4.00989E+00
14	7.10256E+00	1.59607E-02	0.0	7.08659E+00	4.26884E-01
15	3.39111E+00	7.99926E-03	0.0	3.38311E+00	3.62049E-01
16	3.20729E+00	8.06990E-03	0.0	3.19922E+00	3.50428E-01
17	3.16169E+00	8.98990E-03	0.0	3.15270E+00	3.49956E-01
18	3.15153E+00	1.10435E-02	0.0	3.14048E+00	3.49517E-01
19	3.15243E+00	1.52277E-02	0.0	3.13715E+00	3.46419E-01
20	3.15473E+00	2.23537E-02	0.0	3.13238E+00	3.48574E-01
21	3.17264E+00	3.27260E-02	0.0	3.13992E+00	3.50458E-01
22	3.20798E+00	4.80646E-02	0.0	3.15992E+00	3.50101E-01
23	3.25061E+00	7.05747E-02	0.0	3.18004E+00	3.55051E-01
24	3.31516E+00	1.03479E-01	0.0	3.21169E+00	3.59540E-01
25	3.39445E+00	1.51967E-01	0.0	3.24249E+00	3.59274E-01

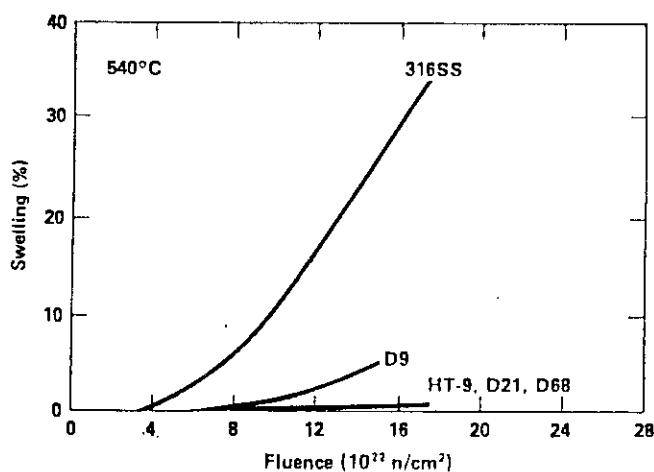


Fig. 2.1 Comparison of swellings of advanced alloys (Ref.1)

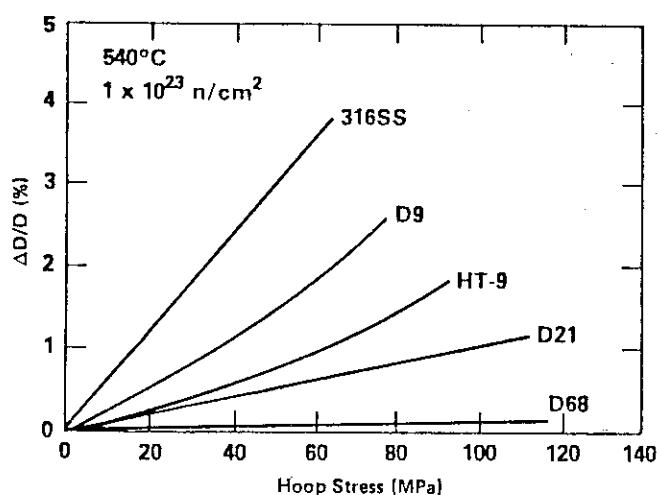
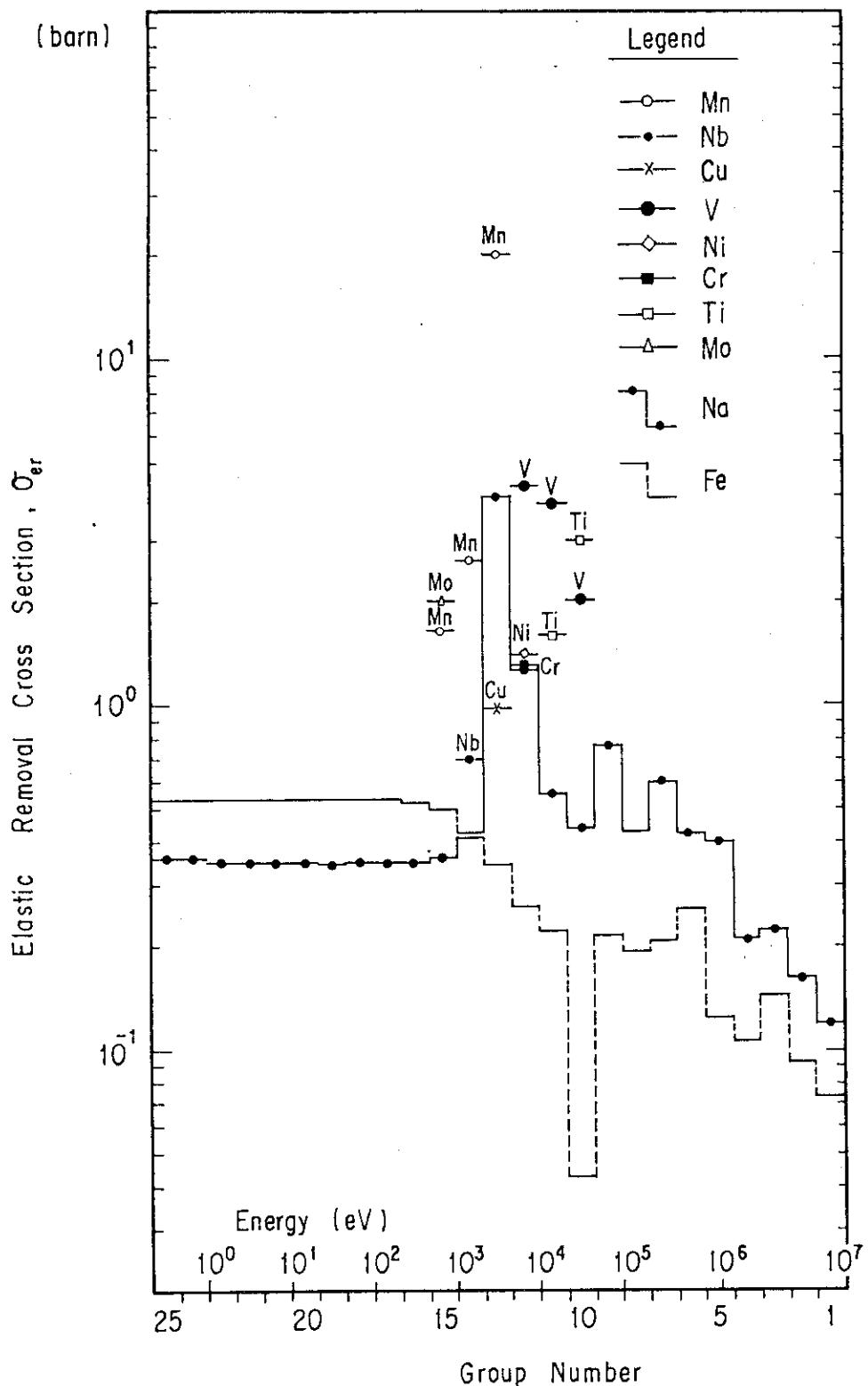


Fig. 2.2 Creep resistance of advanced alloys to irradiation (Ref.1)



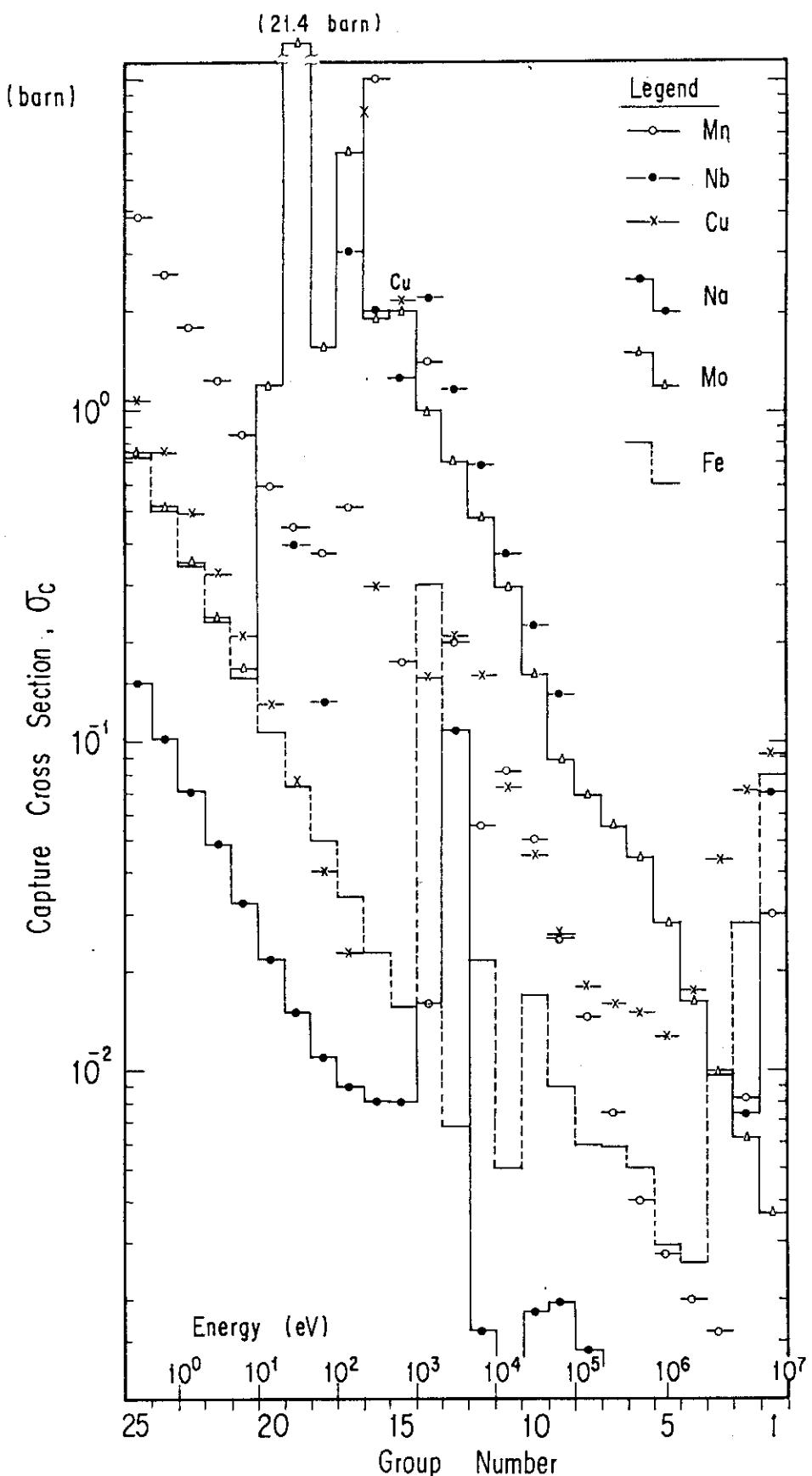


Fig. 2.4-1 Capture cross-sections of structure materials
— Mn, Nb, Cu, Mo, Fe and Na —

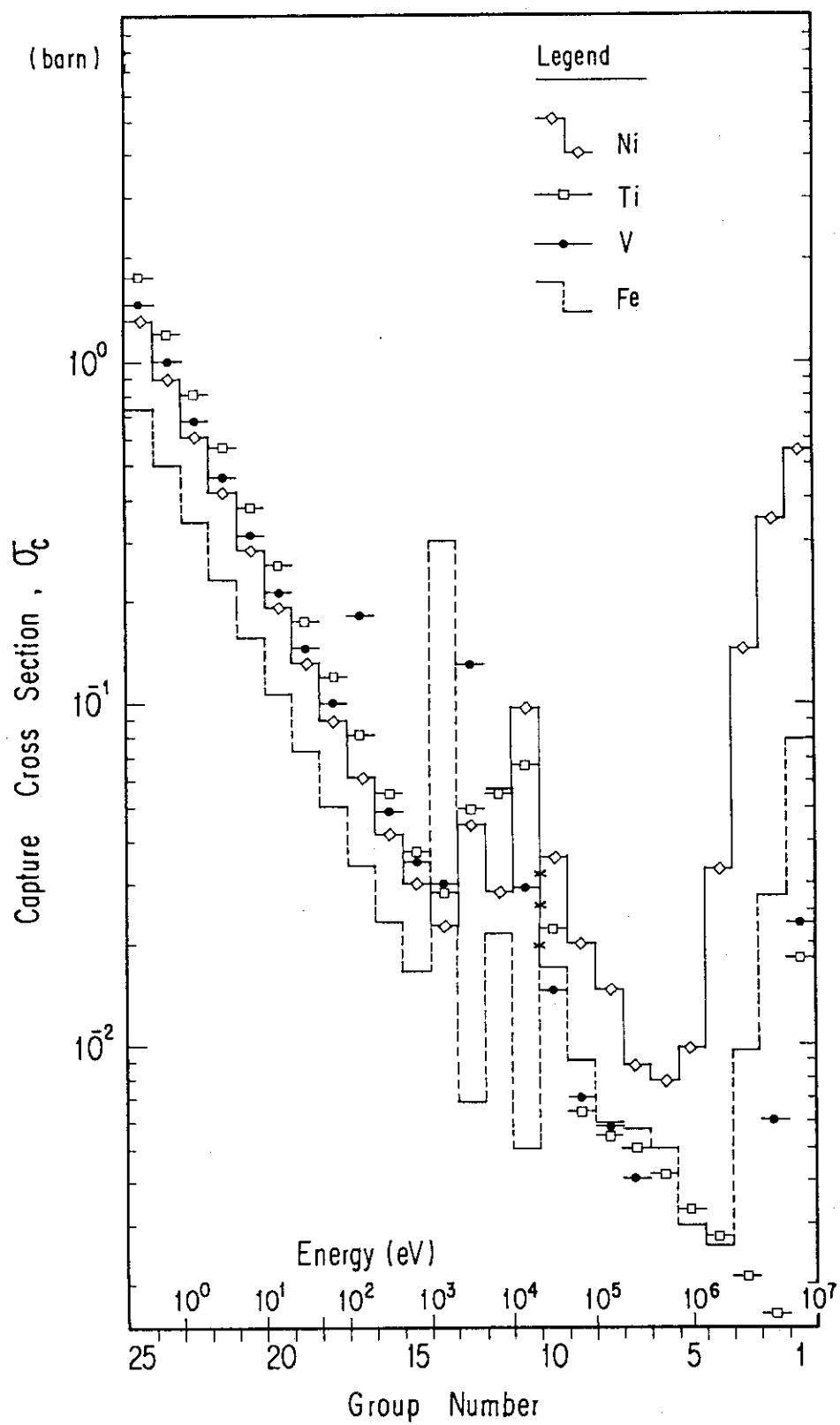


Fig. 2.4-2 Capture cross-sections of structure materials
—Ni, Ti, V and Fe —

3. 代替構造材を用いた高速炉の核特性

316 不銹鋼に代る代替構造材の開発が行なわれていることは前に述べた。代替構造材の熱特性、照射特性および燃料、冷却材との両立性などについてはこの開発計画によって明らかにされるであろうが、代替構造材による核特性に与える影響も評価しておく必要がある。不銹鋼に代る代替構造材を高速炉の燃料ピン被覆管および燃料集合体ラッパ管などに使用した場合の核特性を論ずるには、個々の構造材の物性を充分に考慮した炉心最適設計が必要であるが、今回の検討ではこの意味での個々の構造材に対する炉心最適設計を行なわず、不銹鋼構造材に基く炉心設計をすべての構造材について統一的に適用することにした。すなわち、不銹鋼構造材に基く基準炉心の不銹鋼をすべて代替構造材によって置換し、代替構造材に基く代替炉心の核特性を検討することにした。基準構造材は316不銹鋼であり、代替構造材としては耐熱金属のV, Ti, Niと添加物金属のCu, Mn, Mo, Nbの7つの金属単体を考慮した。

3.1 計算モデル

基準炉心は等価直径305.6 cm、高さ100 cmの炉心部を有し、その出力規模は1000 MWe (2500 MWt)である。計算に用いた円筒形体系モデルをFig. 3.1に示し、その各領域の組成をTable 3.1に示した。2領域からなる炉心の燃料はPuO₂ - UO₂であり、燃料ピンは直径6.5 mmの比較的細径のものである。また、代替構造材と置換される不銹鋼構造材の占める体積割合は領域によって若干の差異はあるが約20 v/oである。この不銹鋼の組成であるFe, Cr, Ni, Moと置換する代替構造材の組成をTable 3.2に示した。

検討の対象とする核特性は臨界性、増殖性、Naボイド反応度効果であるが、臨界性、増殖性の検討のために燃焼計算を行なった。以上の核特性評価には25群断面積セットJFS-II²⁾と2次元拡散・燃焼コードPHENIX⁴⁾を使用した。基準炉心では比較的細径の燃料ピンを使用している関係上、増殖性も比較的低くなると考えられるので、燃料交換周期0.5年、3バッチ分散型燃料交換方式、稼動率80%を仮定した燃焼計算を行なうこととした。このために取出し燃料の最大燃焼度は低く抑えられることになると考えられるが、今回の特性比較検討の結果に影響を及ぼすとは考えられない。

上述の仮定に基づけば、燃料の炉内滞在期間1年は実効全出力照射期間292日(292EFPD)に相当し、平衡サイクル初期(BOEC)、平衡サイクル終期(EOEC)では、炉内滞在期間がそれぞれ0.5年、1年の燃料でもって炉心を含む各領域が形成されると考えられる。したがって、異なる燃焼状態の初装荷時(BOL)、BOEC、EOECにおける組成は、ワンスループ燃焼計算の0 EFPD、146 EFPD、292 EFPD時における組成でもって近似的に表わすことができる。

この検討の多くは、BOL時燃料組成をすべての代替構造材について同一としたものに基くが、より詳細な検討を要するV, Ti, Niの場合には、不銹鋼と同様にEOEC時のKeffが約1.005になるようにBOL時燃料組成を調節した場合についても検討を加えた。したがって、

計算対象とした体系は燃料組成の相違を含めて11ケースであり、その名称と概要を Table 3.3 にまとめた。

3.2 臨界性

構造材を除くとすべての組成が同一であるとした場合の異なる構造材についての実効増倍率を BOL, BOEC, EOEC に対して Table 3.4 に示した。この結果、V と Ti が不銹鋼と比較してかなり高い実効増倍率を与える、Ni は若干低い実効増倍率を、その他の構造材は非常に低い実効増倍率を、それぞれ与えている。したがって、臨界性の観点からは、 $Ti > V >$ 不銹鋼 $> Ni > Cu > Mn > Mo > Nb$ となる。核分裂中性子発生数を 1 に規格化し、BOL 時の各体系の中性子バランスを Table 3.5 に示した。この結果、上述の構造材による臨界性の相違は構造材自身の中性子吸収特性に依存していることがわかる。Ti, V, 不銹鋼, Ni, Cu, Mn, Mo, Nb の全中性子吸収に対する中性子吸収割合は、それぞれ、4.1%, 3.9%, 6.6%, 10.3%, 13.2%, 15.3%, 29.1%, 31.1% である。Ti と V の中性子吸収割合と臨界性の関係が逆転しているが、これはスペクトル変化による ^{239}Pu の α 値の相違であろうことが Table 3.5 から推定できる。

Table 3.4 には、平衡サイクル期間 (BOEC-EOEC) での燃焼に伴なう平均的反応度損失率について併記しているが、不銹鋼と比較して、Mn を除くすべての構造材の反応度損失が大きくなる傾向がある。しかし、構造材の臨界性を考慮して BOL 時の燃料組成を調節すれば、Ti, V を除く構造材に対する Pu 富化度は著しく高くなり、炉心増殖比も低下するので、燃焼反応度損失は大きくなるものと考えられる。

V, Ti, Ni について、不銹鋼と同様に EOEC 時の K_{eff} が約 1.005 になるように BOL 時の燃料組成を調節し、その場の BOL 時の燃料組成と燃焼による実効増倍率の変化を Table 3.6 と 3.7 にそれぞれ示した。核分裂性 Pu 量 ($^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$) は、不銹鋼と比較して、V, Ti では 4.8%, 5.9% それぞれ減少し、Ni では 5.7% 増加する。また、燃焼反応度損失は、 $Ti < \text{不銹鋼} < V < Ni$ となり、BOL 時の臨界性、燃焼反応度損失を含めた臨界性では、Ti が最良の構造材であり、V は不銹鋼と同程度、Ni は不銹鋼より若干劣るが比肩しうる構造材であると云える。Cu, Mn, Mo, Nb は構造材合金の基金属となるとは考えられず、微量の添加物として用いられると考えられるので、臨界性に劣る性質はあまり問題にならないだろう。

3.3 増殖性

BOL 時の燃料組成をすべての構造材に対して共通とした場合の増殖比を Table 3.8 に示した。この場合には、すべての代替構造材の増殖比は不銹鋼と比較して低い。このことは単に構造材の中性子吸収断面積のみではなく、非弾性および弾性散乱断面積によって炉心内の中性子スペクトルおよび周辺ブランケットへの中性子漏洩が影響を受けることを意味している。増殖比 BR を、

$$BR = \frac{N_c^{28} \langle \sigma_c \rangle_{c^{28}} + N_c^{40} \langle \sigma_c \rangle_{c^{40}} + N_B^{28} \langle \sigma_c \rangle_{B^{28}} \cdot \phi_B / \phi_c}{N_c^{49} \langle \sigma_a \rangle_{c^{49}} + N_c^{41} \langle \sigma_a \rangle_{c^{41}}} \quad (3.1)$$

と書く。ここで、 N_c^{28} , N_c^{49} , N_c^{40} , N_c^{41} は炉心における ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu の平均原子数密度, N_B^{28} はブランケットにおける ^{238}U の平均原子数密度である。また、 $\langle \sigma_x \rangle$ は炉心またはブランケットの実効的なミクロ 1 群断面積であり、 ϕ_B / ϕ_c は炉心に対するブランケットの全中性子数比である。不銹鋼構造材に基く基準炉心の増殖比からの相違は、すべての代替構造材に基く炉心の燃料組成は変わらないので、

$$\begin{aligned} \frac{\delta BR}{BR} &\cong \frac{N_c^{28} \delta \langle \sigma_c \rangle_{c^{28}} + N_c^{40} \delta \langle \sigma_c \rangle_{c^{40}} + N_B^{28} \delta \langle \sigma_c \rangle_{B^{28}} \cdot (\phi_B / \phi_c)}{N_c^{28} \langle \sigma_c \rangle_{c^{28}} + N_c^{40} \langle \sigma_c \rangle_{c^{40}} + N_B^{28} \langle \sigma_c \rangle_{B^{28}} (\phi_B / \phi_c)} \\ &+ \frac{N_c^{49} \delta \langle \sigma_a \rangle_{c^{49}} + N_c^{41} \delta \langle \sigma_a \rangle_{c^{41}}}{N_c^{49} \langle \sigma_a \rangle_{c^{49}} + N_c^{41} \langle \sigma_a \rangle_{c^{41}}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

とかける。右辺第 1 項は親物質の中性子捕獲反応の変化率、第 2 項は核分裂性物質の中性子吸収反応の変化率である。Table 3.8 に示した結果を不銹鋼を基準として上式にしたがって各要素に区分し、Table 3.9 に示した。この結果、不銹鋼より臨界性にすぐれた Ti, V は、核分裂性物質の吸収断面積が大きくなることによって増殖性を損ねているが、特に Ti はブランケットの中性子束レベルが高くなることで V より増殖比を回復している。Nb, Mo は、核分裂性物質の $\langle \sigma_a \rangle$ の減少による増殖比增加効果以上に ^{238}U の $\langle \sigma_c \rangle$ の減少による増殖比減少効果の方が著しく大きくなり、その結果として低い増殖比を与えることになっている。

構造材の臨界性を考慮して BOL 時の燃料組成を調節した場合の増殖比を Ti, V, Ni 不銹鋼について Table 3.10 に示した。この結果、著しく核分裂性物質量が減少した Ti の場合は、不銹鋼と比較してかなり増殖比が高くなるが、同様の状況にある V の場合は不銹鋼と同程度の増殖比にとどまっている。したがって、構造材の臨界性を考慮すれば、増殖性の順位は Ti > 不銹鋼 \cong V > Ni > Mn > Cu > Mo > Nb の順になると考えられる。

3.4 Na ボイド反応度効果

7 種の構造材核種はいずれも 2.3 KeV にピークを有する Na の共鳴領域の近傍にかなり大きな共鳴領域がある。したがって Na 壓失時の中性子スペクトル硬化に伴なう正の反応度印加を緩和する可能性がある。

Na ボイド反応度効果はかなり強い燃焼依存性があり、燃料組成の変化よりもむしろ核分裂生成物の蓄積によってより正の反応度効果をもたらす。したがって、燃焼によって異なる構造材に対する Na ボイド反応度効果の傾向も変る可能性があるが、こゝでは、BOL 時に限定して比較検討することにした。

BOL 時の Na ボイド反応度効果を Table 3.11 に示したが、ボイド領域としては炉心全域と

した。不銹鋼と比較すると、Ti, V, Ni は正の Na ボイド反応度効果を 13%, 25%, 20%, それぞれ低減するが、Cu, Mn, Mo, Nb は正の Na ボイド反応度効果をより増加させる。この原因を検討するには摂動論が有効であるが、こゝでは簡便に中性子バランスを用いて検討する。Table 3.12 にその結果を示したが、Na 充填時、ボイド時共に体系の核分裂中性子発生数を 1 に規格化し、体系での中性子吸収割合と中性子漏洩割合の変化として表示した。

V に対して Na ボイド効果が小さくなるのは、Na がボイドすることにより局所的な中性子スペクトル変化が生じ、²³⁸U の中性子吸収割合が増加することにある。Ti については、Na ボイド時の中性子漏洩割合が大きくなることが Na ボイド効果を小さくする働きをし、Ni については、Na ボイド時の Ni 自身の中性子吸収割合が増加することが小さな Na ボイド効果を与える要因である。一方、Mn, Mo, Nb については、Na ボイド時にスペクトル変化に伴ない構造材自身の中性子吸収割合が著しく減少することが大きな Na ボイド効果を与える要因である。BOL 時の各構造材についての Na ボイドによる中性子スペクトル変化を Fig. 3.2 に示した。

構造材の臨界性を考慮して BOL 時の燃料組成を調節した場合の V, Ti, Ni, 不銹鋼について、その Na ボイド反応度効果を Table 3.13 に示した。Table 3.11 の結果と比較すれば、燃料組成の相違が Na ボイド反応度効果に与える影響は非常に小さいことがわかる。

以上の結果に基くと、正の Na ボイド反応度低減化に資する構造材は、V > Ni > Ti > 不銹鋼 > Cu > Mn > Nb > Mo の順になると考えられる。

3.5 スペクトルインデックスと出力分布

各構造材に基く体系の内部炉心平均の中性子スペクトルを Fig. 3.2 に示したが、比較が容易でないのでスペクトルインデックスを用いて比較してみる。インデックスとしては、²³⁵U に対する ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²³⁸U, ²⁴¹Am の核分裂率比 ⁴⁹f / ²⁵f, ⁴⁰f / ²⁵f, ²⁸f / ²⁵f, ⁵¹f / ²⁵f をとり、結果を Table 3.14 に示した。中性子スペクトルの硬さの順に並べると、Mo > Nb > Mn > Ti > Ni > Cu > V ≃ 不銹鋼、となる。

BOL 時の各構造材を用いた時の炉心中心面径方向出力分布を不銹鋼の場合と比較しながら Fig. 3.3 に示した。いずれも原子炉熱出力 2500 MWt に規格化している。この図から、V, Ni についての分布は不銹鋼のそれとはほぼ同じであり、Ti, Cu, Mn, Mo, Nb の順で出力分布は不銹鋼のそれと比べて異なってくる。Mn, Mo, Nb については、これらの核種の強い中性子吸収特性の影響が内部炉心内の分布にみられる。

ここで検討を加えた構造材の内、不銹鋼の主要要素である Fe, Cr, Ni およびその添加物である Mn, Mo については、サンプル反応度値が測定されている。その一例を予測精度をみるために、Table 3.15 に ZPPR における測定を JENDL-2 で解析した結果⁽⁵⁾を C/E の形で示した。この C/E は ²³⁹Pu に対する C/E を 1 とした時の値であり、解析法を含めて核断面積データの精度が未だ不充分であることを示している。加えて、V, Ti, Cu, Nb についてはほとんど積分実験データが存在しない。

V, Ti, Ni は臨界性、増殖性、Na ボイド反応度効果の観点から不銹鋼と匹敵するかあるいはよりすぐれた構造材であるが、それは核断面積データの精度に大きく依存する。したがって、

構造材の炉物理特性を明確にする積分実験は、上述のすぐれた特性を検証すると同時に、核断面積データ評価のための有用な積分実験になりうる。

Table 3.1 Atomic Number Densities at BOL

	INNER CORE	OUTER CORE	RB	AB 1	AB 2
PU-239	6.44495E-04	9.48765E-04	0.0	0.0	0.0
PU-240	2.66688E-04	3.92593E-04	0.0	0.0	0.0
PU-241	1.55556E-04	2.29012E-04	0.0	0.0	0.0
PU-242	4.44480E-05	6.54321E-05	0.0	0.0	0.0
U -235	1.62758E-05	1.78121E-05	3.19078E-05	2.05397E-05	2.37555E-05
U -236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U -238	5.40899E-03	5.91955E-03	1.06040E-02	6.82603E-03	7.89476E-03
O	1.29422E-02	1.49948E-02	2.12719E-02	1.36931E-02	1.58370E-02
NA	1.13336E-02	9.61090E-03	8.14182E-03	1.13336E-02	9.61090E-03
CR	3.73618E-03	4.06584E-03	3.25308E-03	3.73618E-03	4.06584E-03
NI	2.20532E-03	2.39991E-03	1.92017E-03	2.20532E-03	2.39991E-03
MO	2.25111E-04	2.44974E-04	1.96004E-04	2.25111E-04	2.44974E-04
FE	1.31415E-02	1.43010E-02	1.14423E-02	1.31415E-02	1.43010E-02
AM-241	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP(U)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP(PU)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 3. 2 Atomic Number Densities of Alternative Structure Materials
 $(\times 10^{24} \text{ n}/\text{cm}^3)$

Material	IC	OC	RB	AB - 1	AB - 2
V (5.87)	1.44151 - 2	1.56851 - 2	1.36030 - 2	1.44151 - 2	1.56851 - 2
Ni (8.80)	1.87508 - 2	2.04029 - 2	1.76945 - 2	1.87508 - 2	2.04029 - 2
Nb (8.40)	1.13105 - 2	1.23071 - 2	1.06734 - 2	1.13105 - 2	1.23071 - 2
Mo (9.01)	1.19734 - 2	1.30284 - 2	1.12825 - 2	1.19734 - 2	1.30284 - 2
Ti (4.50)	1.17524 - 2	1.27879 - 2	1.10904 - 2	1.17524 - 2	1.27879 - 2
Cu (8.93)	1.75856 - 2	1.91351 - 2	1.65950 - 2	1.75856 - 2	1.91351 - 2
Mn (7.3)	1.66226 - 2	1.80872 - 2	1.56862 - 2	1.66226 - 2	1.80872 - 2

() : density (g/cm^3)

Table 3.3 Brief Description of Systems with Different Structure Materials

System	Fuel and Na	Structure
FBR-SS	Table 3.1	SUS-316
FBR-V	"	V
FBR-Ti	"	Ti
FBR-Ni	"	Ni
FBR-Cu	"	Cu
FBR-Mn	"	Mn
FBR-Mo	"	Mo
FBR-Nb	"	Nb
FBR-V-C	Table 3.6	V
FBR-Ti-C	"	Ti
FBR-Ni-C	"	Ni

Table 3.4 Variation of Effective Multiplication Factors due to Burnup

	Keff			Reactivity-loss (%Δk/kk'/cycle)
	BOL	BOEC	EOEC	
FBR-SS	1.0570	1.0292	1.0047	2.37
FBR-V	1.0895	1.0565	1.0274	2.68
FBR-Ti	1.0902	1.0597	1.0328	2.46
FBR-Ni	1.0308	1.0035	0.9794	2.45
FBR-Cu	1.0092	0.9820	0.9579	2.56
FBR-Mn	0.9913	0.9672	0.9460	2.32
FBR-Mo	0.9061	0.8819	0.8600	2.89
FBR-Nb	0.8764	0.8526	0.8311	3.03

Table 3.5 Neutron Balance of LMFBRs with Various
Structure Materials at BOL

System Neutron Balance	FBR -SS	FBR - V	FBR -Ti	FBR -Ni	FBR -Cu	FBR -Mn	FBR -Mo	FBR -Nb
Fission Yield	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Leakage	0.043	0.045	0.058	0.034	0.041	0.040	0.039	0.043
Absorption	0.905	0.875	0.862	0.939	0.952	0.972	1.067	1.101
U - 235	0.011	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010	0.009	0.009
U - 238	0.427	0.414	0.416	0.423	0.413	0.419	0.373	0.372
Pu - 239	0.267	0.271	0.261	0.269	0.264	0.260	0.248	0.249
Pu - 240	0.040	0.041	0.041	0.041	0.040	0.040	0.038	0.038
Pu - 241	0.085	0.086	0.082	0.084	0.084	0.081	0.077	0.077
Pu - 242	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
O	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003
Na	0.006	0.008	0.007	0.006	0.006	0.004	0.004	0.004
St .Mat.	0.060	0.034	0.035	0.097	0.126	0.149	0.310	0.342

Table 3.6 Atomic Number Densities in the Cores of FBR-SS,
FBR-V-C, FBR-Ti-C and FBR-Ni-C at BOL
($\times 10^{24}$ n/cm³)

Nuclide	FBR-SS	FBR-V-C	FBR-Ti-C	FBR-Ni-C
<u>Inner Core</u>				
U - 235	1.6276 E - 05	1.6436 E - 05	1.6473 E - 05	1.6086 E - 05
U - 238	5.4090 E - 03	5.4622 E - 03	5.4744 E - 03	5.3459 E - 03
Pu - 239	6.4450 E - 04	6.1356 E - 04	6.0647 E - 04	6.8124 E - 04
Pu - 240	2.6669 E - 04	2.5389 E - 04	2.5096 E - 04	2.8189 E - 04
Pu - 241	1.5557 E - 04	1.4810 E - 04	1.4639 E - 04	1.6444 E - 04
Pu - 242	4.4448 E - 05	4.2314 E - 05	4.1826 E - 05	4.6981 E - 05
O	1.2942 E - 02			
Na	1.1334 E - 02			
<u>Outer Core</u>				
U - 235	1.7812 E - 05	1.8047 E - 05	1.8101 E - 05	1.7532 E - 05
U - 238	5.9196 E - 03	5.9978 E - 03	6.0157 E - 03	5.8265 E - 03
Pu - 239	9.4877 E - 04	9.0323 E - 04	8.9279 E - 04	1.0029 E - 03
Pu - 240	3.9259 E - 04	3.7375 E - 04	3.6943 E - 04	4.1497 E - 04
Pu - 241	2.2901 E - 04	2.1802 E - 04	2.1550 E - 04	2.4206 E - 04
Pu - 242	6.5432 E - 05	6.2291 E - 05	6.1571 E - 05	6.9162 E - 05
O	1.4995 E - 02			
Na	9.6109 E - 03			

* Values were decided so as to be Keff = 1.005 at EOEC.

** See Table 3.1 or Table 3.2 for structure materials.

Table 3.7 Variation of Effective Multiplication Factors due
to Burnup for FBR-SS, FBR-V-C, FBR-Ti-C
and FBR-Ni-C

System	Keff			Reactivity - loss (%Δk/kk'/cycle)
	BOL	BOEC	EOEC	
FBR-SS	1.0570	1.0292	1.0047	2.37
FBR-V-C	1.0621	1.0315	1.0050	2.56
FBR-Ti-C	1.0561	1.0288	1.0050	2.30
FBR-Ni-C	1.0619	1.0320	1.0051	2.59

Table 3.8 Breeding Ratios of LMFBRS with Various
Structure Materials

	Core	Blanket	Total
FBR-SS	0.753	0.372	1.125
FBR-V	0.714	0.356	1.070
FBR-Ti	0.716	0.381	1.097
FBR-Ni	0.748	0.364	1.112
FBR-Cu	0.743	0.352	1.095
FBR-Mn	0.765	0.355	1.120
FBR-Mo	0.711	0.322	1.031
FBR-Nb	0.705	0.323	1.028

Table 3.9 Difference of Breeding Ratios of FBRs from that of FBR-SS
(unit : %)

System	$\delta < \sigma_c >_{C^{28}}$	$\delta < \sigma_c >_{C^{40}}$	$\delta < \sigma_c^{28} >_B$	$\delta < \phi_B / \phi_C >$	$\delta < \phi_B / \phi_C >$	$\delta < \sigma_a >_{C^{41}}$	Total
FBR-V	+ 1.47	+ 0.82	+ 0.56	+ 0.99	- 5.77	- 2.84	- 4.77
FBR-T	- 2.04	+ 0.15	- 2.09	+ 3.75	- 1.60	- 0.79	- 2.62
FBR-Ni	+ 1.29	+ 0.36	+ 1.71	- 1.40	- 2.76	- 0.75	- 1.55
FBR-Cu	- 2.18	- 0.22	- 1.69	- 0.69	+ 1.60	+ 0.91	- 2.21
FBR-Mn	+ 0.10	- 0.18	- 0.74	- 1.19	+ 0.78	+ 1.02	- 0.20
FBR-Mo	- 10.52	- 1.22	- 6.48	- 1.66	+ 7.52	+ 4.13	- 8.23
FBR-Nb	- 11.11	- 1.21	- 6.57	- 1.46	+ 7.74	+ 4.19	- 8.41

$$\frac{\delta_{BR}}{BR} \cong A \{ N_C^{28} \cdot \delta < \sigma_c >_{C^{28}} + N_C^{40} \cdot \delta < \sigma_c >_{C^{40}} + N_B^{28} \cdot (\phi_B / \phi_C) + N_B^{28} \cdot \delta (\phi_B / \phi_C) \}$$

- B [$N_C^{49} \delta < \sigma_a >_{C^{49}} + N_C^{41} \delta < \sigma_a >_{C^{41}}$]

A, B and other notations ; see Eq. (3.2) in the paper

Table 3.10 Breeding Ratios of FBR-SS, FBR-V-C,
FBR-Ti-C and FBR-Ni-C at BOL

System	Core	Blanket	Total
FBR-SS	0.753	0.372	1.125
FBR-V-C	0.751	0.370	1.121
FBR-Ti-C	0.764	0.400	1.164
FBR-Ni-C	0.704	0.348	1.053

Table 3.11 Na-void Reactivity Effects of FBRs at BOL

System	Na-void worth ($\% \Delta k / kk'$)
FBR-SS	1.97
FBR-V	1.47
FBR-Ti	1.72
FBR-Ni	1.58
FBR-Cu	2.25
FBR-Mn	3.69
FBR-Mo	4.53
FBR-Nb	4.09

Table 3.12 Na-void Reactivity Effects obtained by Neutron Balance Method and Their Components

System	FBR-SS	FBR-V	FBR-Ti	FBR-Ni	FBR-Cu	FBR-Mn	FBR-Mo	FBR-Nb
Void worth	+ 2.0	+ 1.5	+ 1.7	+ 1.6	+ 2.3	+ 3.7	+ 4.5	+ 4.1
Neutron leak	- 0.8	- 0.9	- 1.2	- 0.7	- 0.7	- 0.7	- 0.6	- 0.6
Absorption	+ 2.8	+ 2.4	+ 2.9	+ 2.3	+ 3.0	+ 4.4	+ 5.1	+ 4.7
- U-235	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
- U-238	0.0	- 0.6	- 0.1	0.1	0.3	0.2	0.9	0.9
- Pu-239	1.4	1.6	1.7	1.4	1.3	1.3	1.1	1.0
- Pu-240	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
- Pu-241	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4
- Pu-242	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
- O	0.0	0.0	- 0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
- Na	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
- St. Mat.	0.1	0.0	0.0	- 0.4	0.2	2.0	2.3	1.8

(unit : % $\Delta k/kk'$)

Table 3.13 Na-void Reactivity Effects of FBR-SS,
FBR-V-C, FBR-Ti-C and FBR-Ni-C
at BOL

System	Na-void worth (% $\Delta k/kk'$)
FBR-SS	1.97
FBR-V-C	1.44
FBR-Ti-C	1.73
FBR-Ni-C	1.58

Table 3.14 Fission Reaction Rate Ratios

System	$^{49}f/^{25}f$	$^{40}f/^{25}f$	$^{28}f/^{25}f$	$^{51}f/^{25}f$
FBR-SS	0.890	0.171	0.0196	0.134
FBR-V	0.874	0.163	0.0202	0.134
FBR-Ti	0.888	0.182	0.0228	0.148
FBR-Ni	0.905	0.177	0.0202	0.140
FBR-Cu	0.892	0.176	0.0202	0.137
FBR-Mn	0.906	0.191	0.0234	0.154
FBR-Mo	0.941	0.208	0.0245	0.159
FBR-Nb	0.941	0.202	0.0234	0.151

Table 3.15 C/E - Values for Central Sample Worths of
Structure Materials^(3.2)

Material	ZPPR - 2	ZPR - 6 - 7
Pu - 239	1.00	1.00
Fe	1.13	1.04
Cr	1.10	0.97
Ni	1.23	1.15
Mn	1.76	—
Mo	0.95	1.04
Al	1.27	0.94

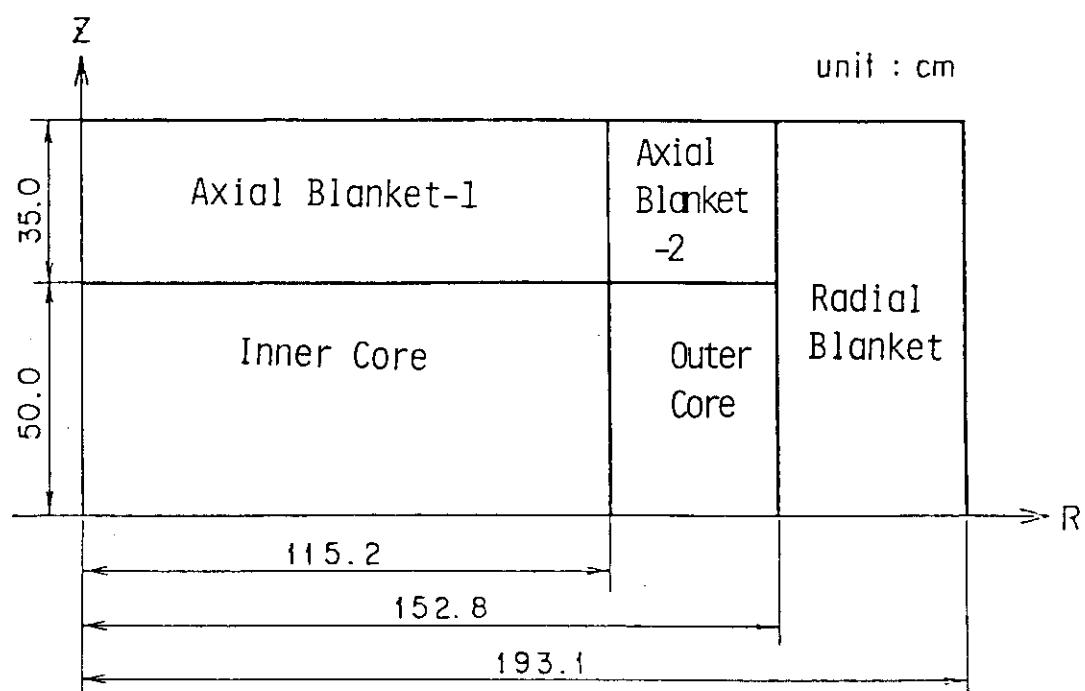


Fig. 3.1 RZ Configuration of 1000 MWe LMFBR

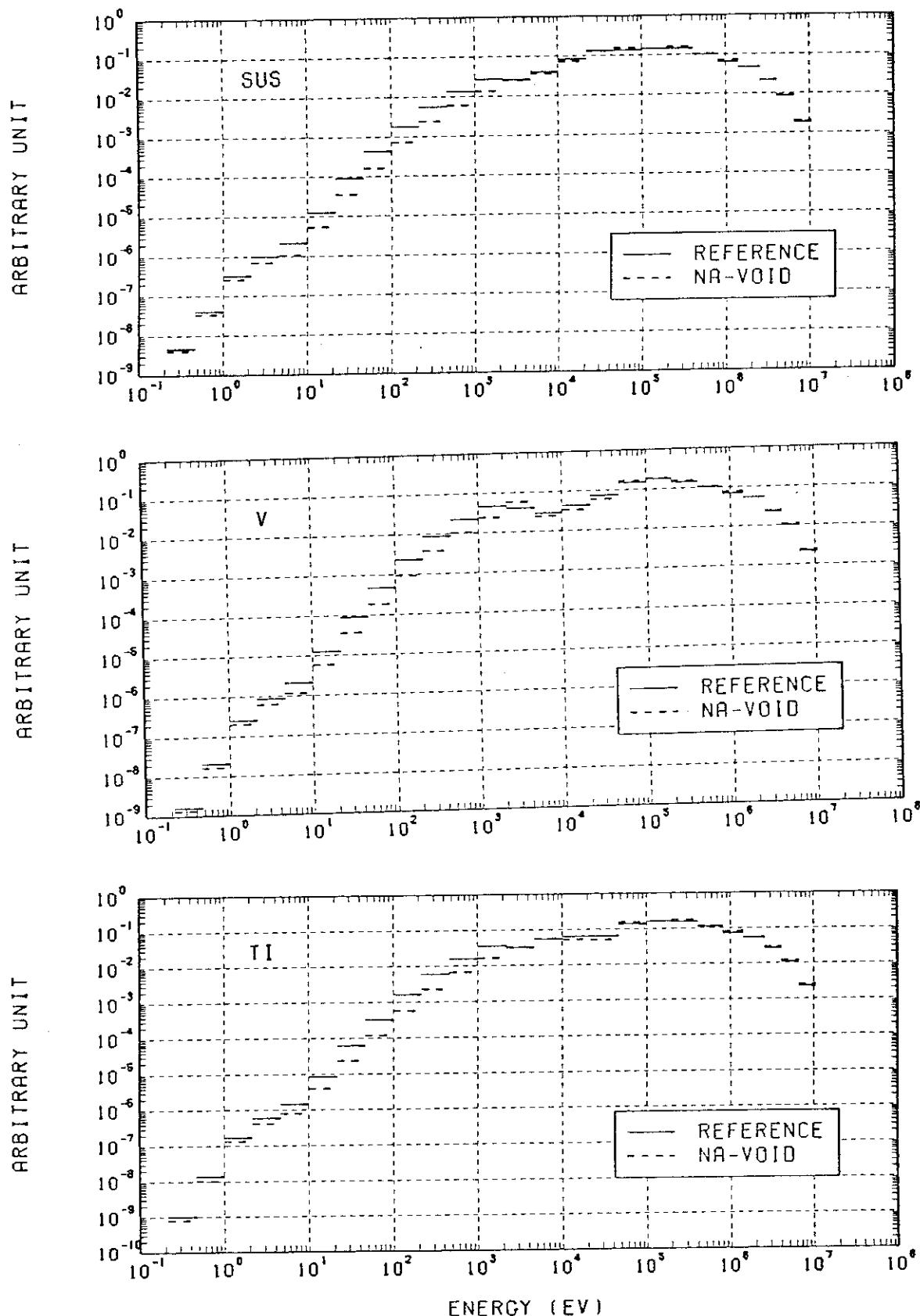


Fig. 3.2-1 Average Neutron Spectra in the Inner Cores of FBR-SS,
FBR-V and FBR-Ti at BOL

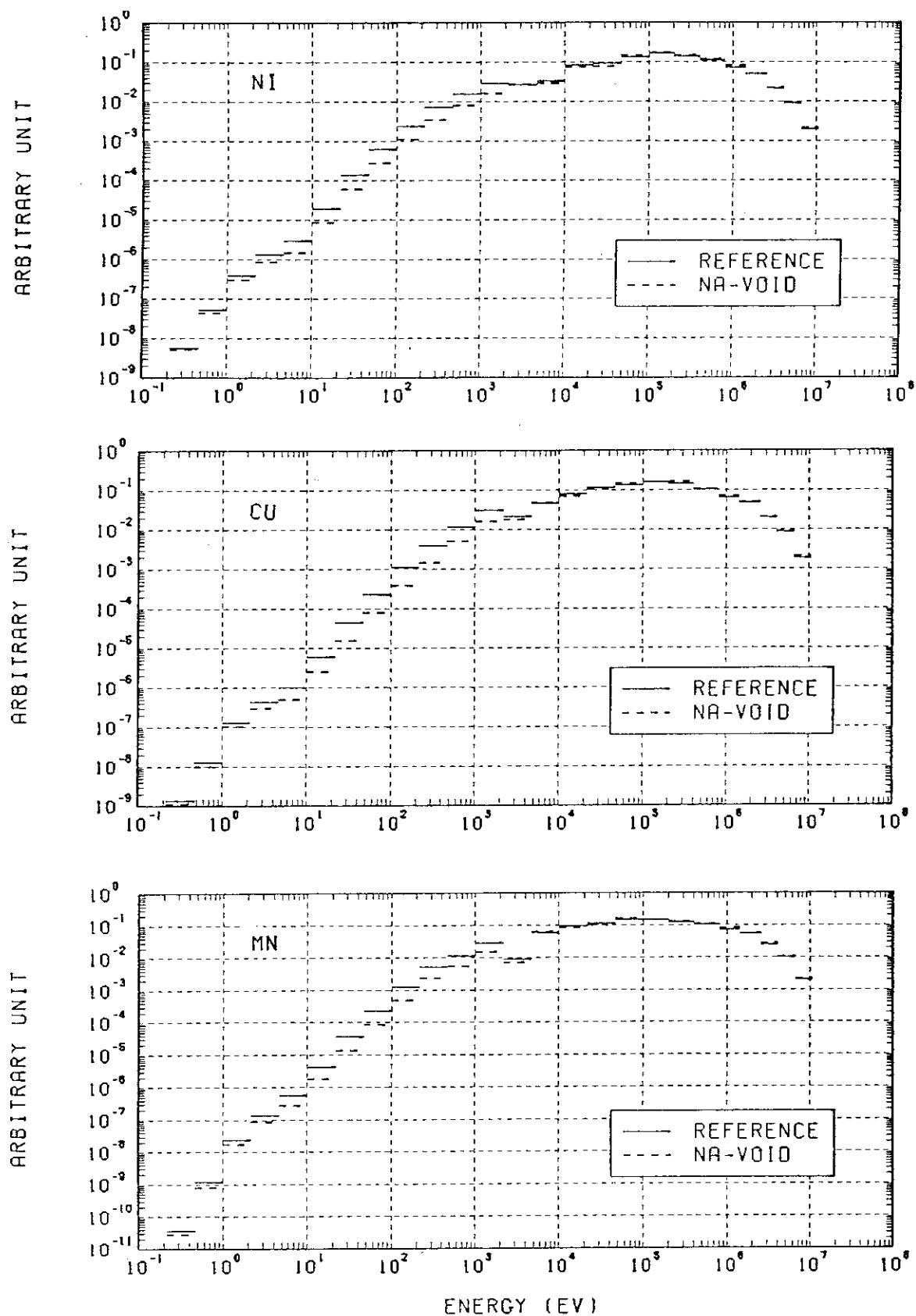


Fig. 3.2-2 Average Neutron Spectra in the Inner Cores of FBR-Ni,
FBR-Cu and FBR-Mn

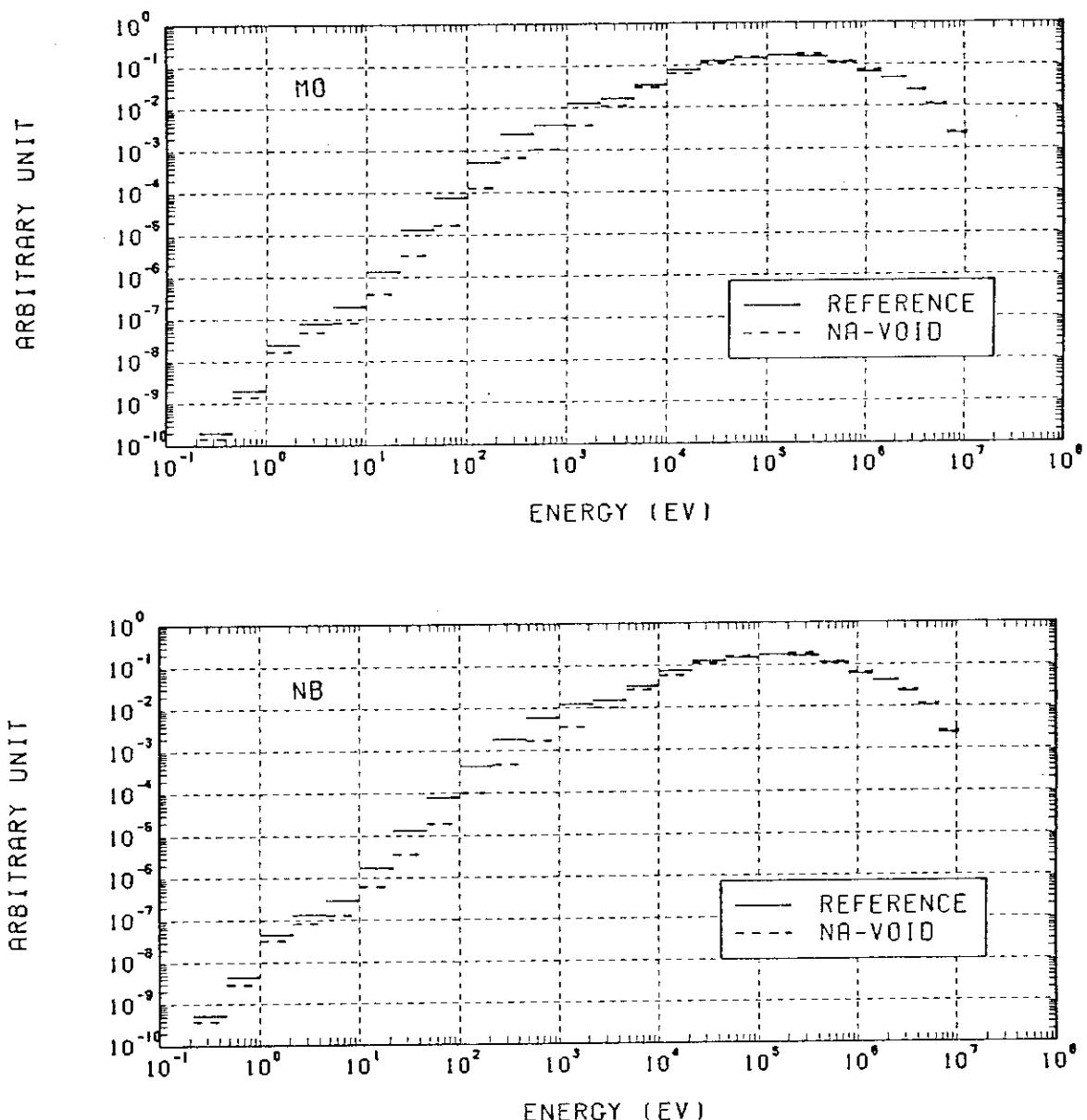


Fig. 3.2-3 Average Neutron Spectra in the Inner Cores of FBR-Mo
and FBR-Nb

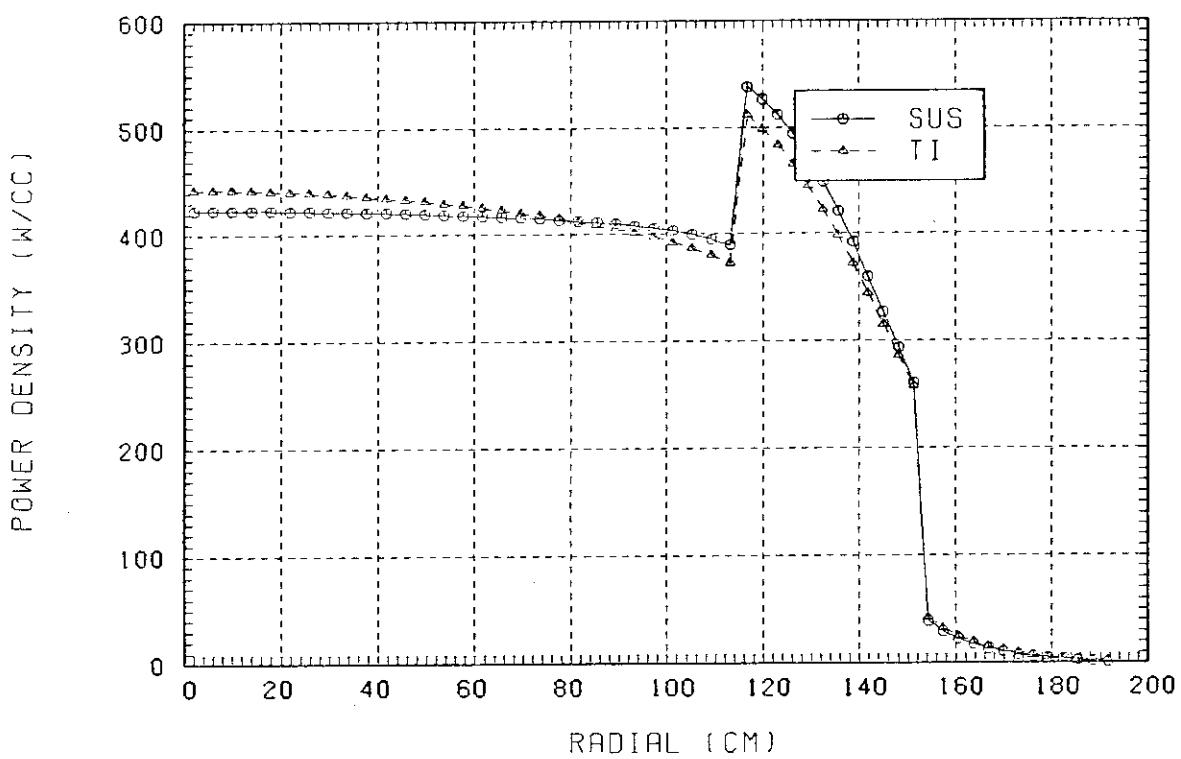
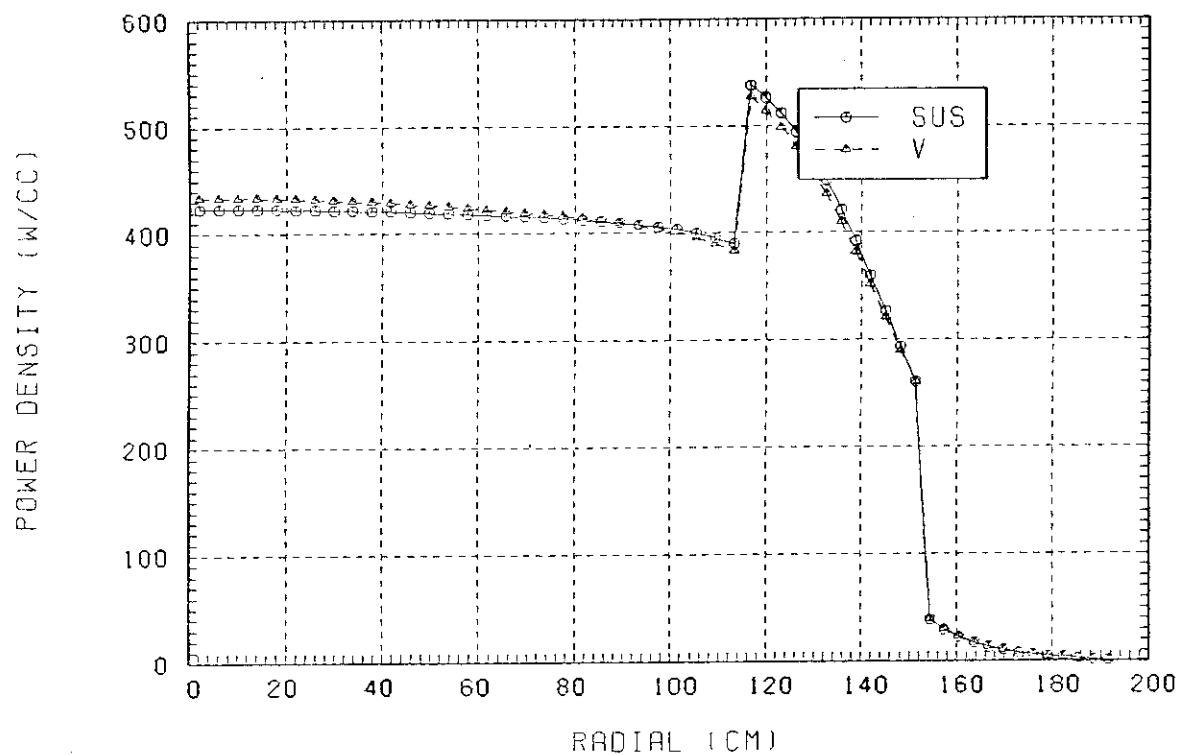


Fig. 3.3-1 Radial Power Distributions of FBR-SS, FBR-V and FBR-Ti

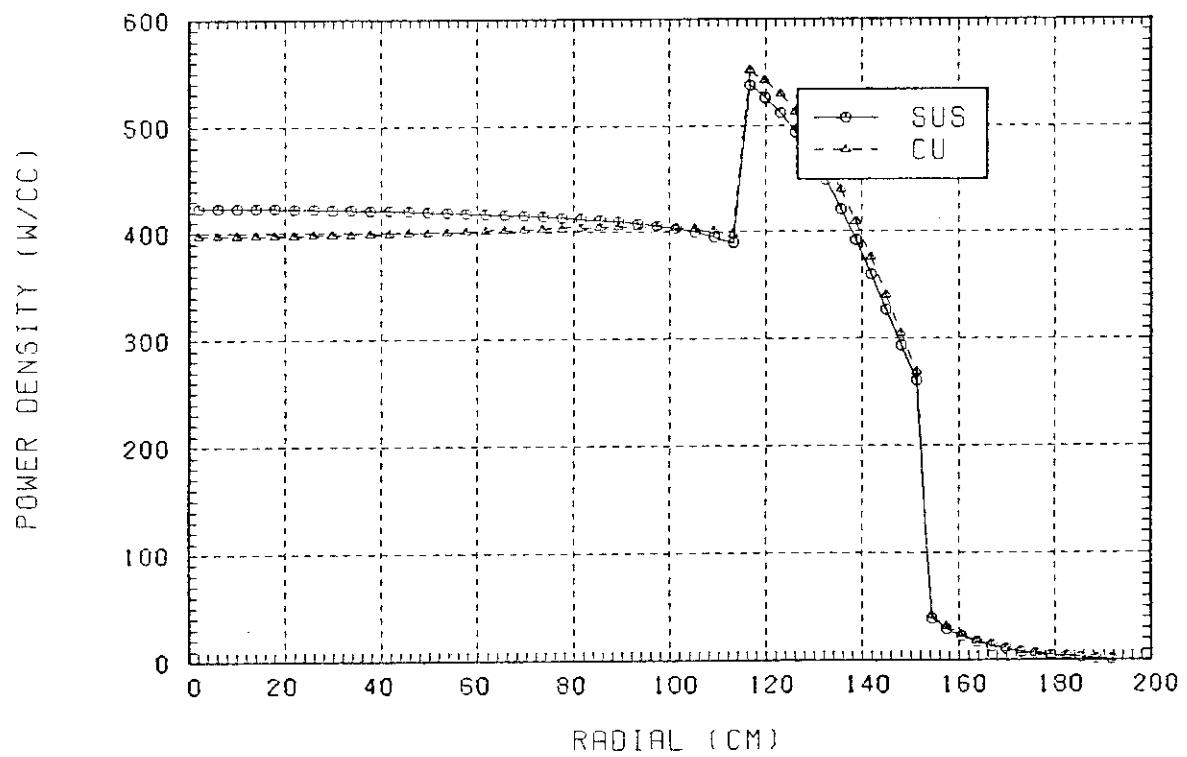
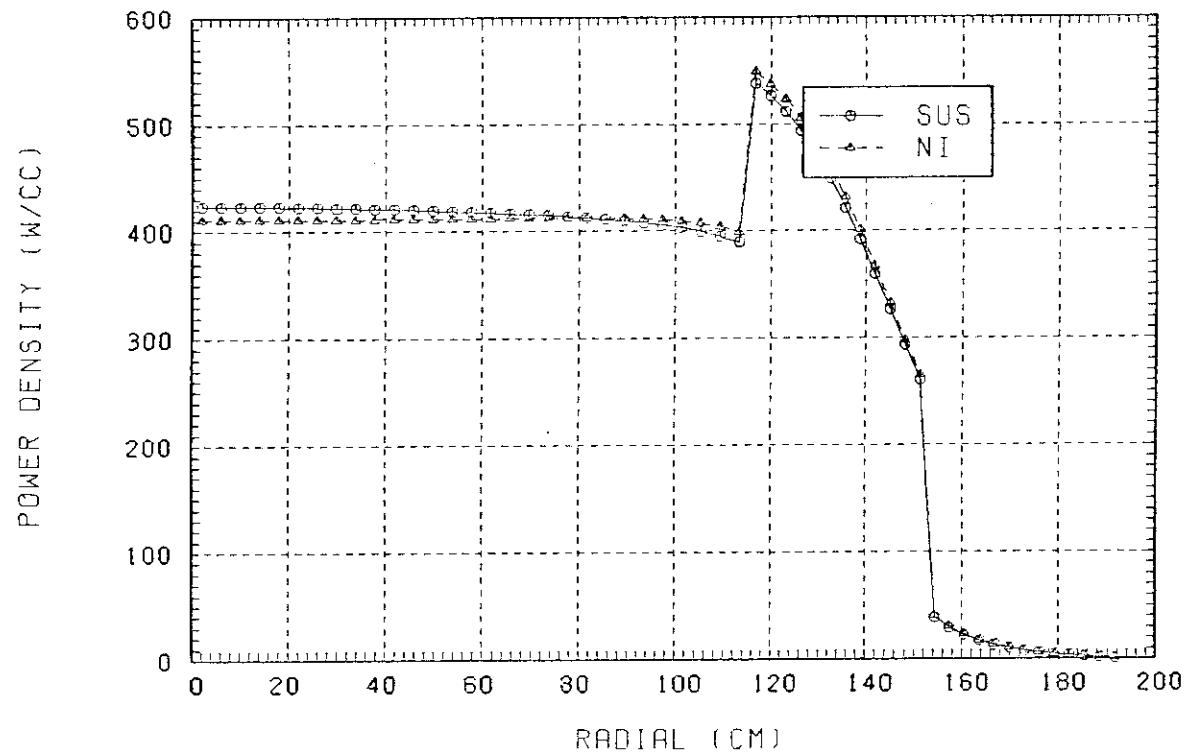


Fig. 3.3-2 Radial Power Distributions of FBR-SS, FBR-Ni and FBR-Cu

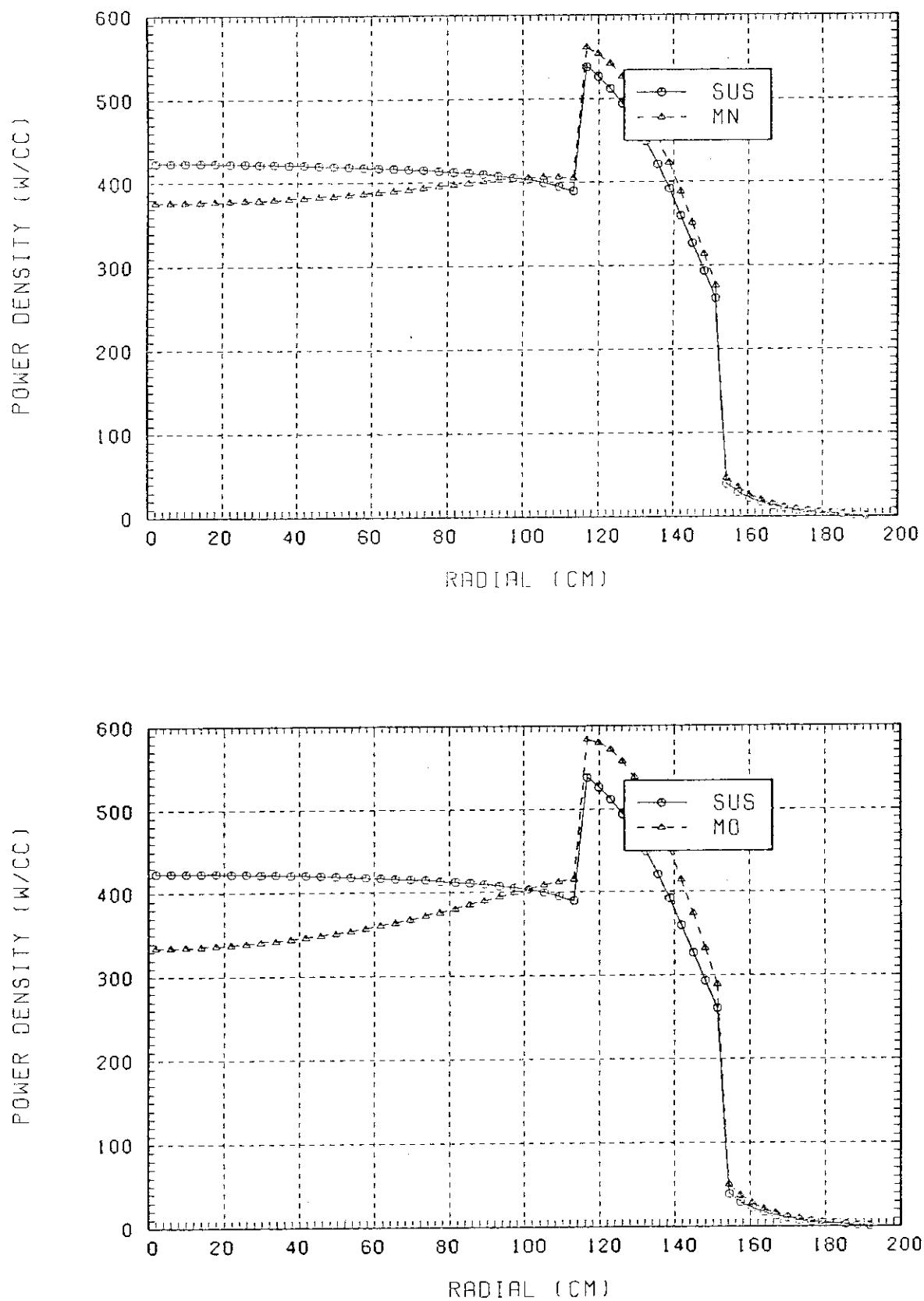


Fig. 3.3-3 Radial Power Distributions of FBR-SS, FBR-Mn and FBR-Mo

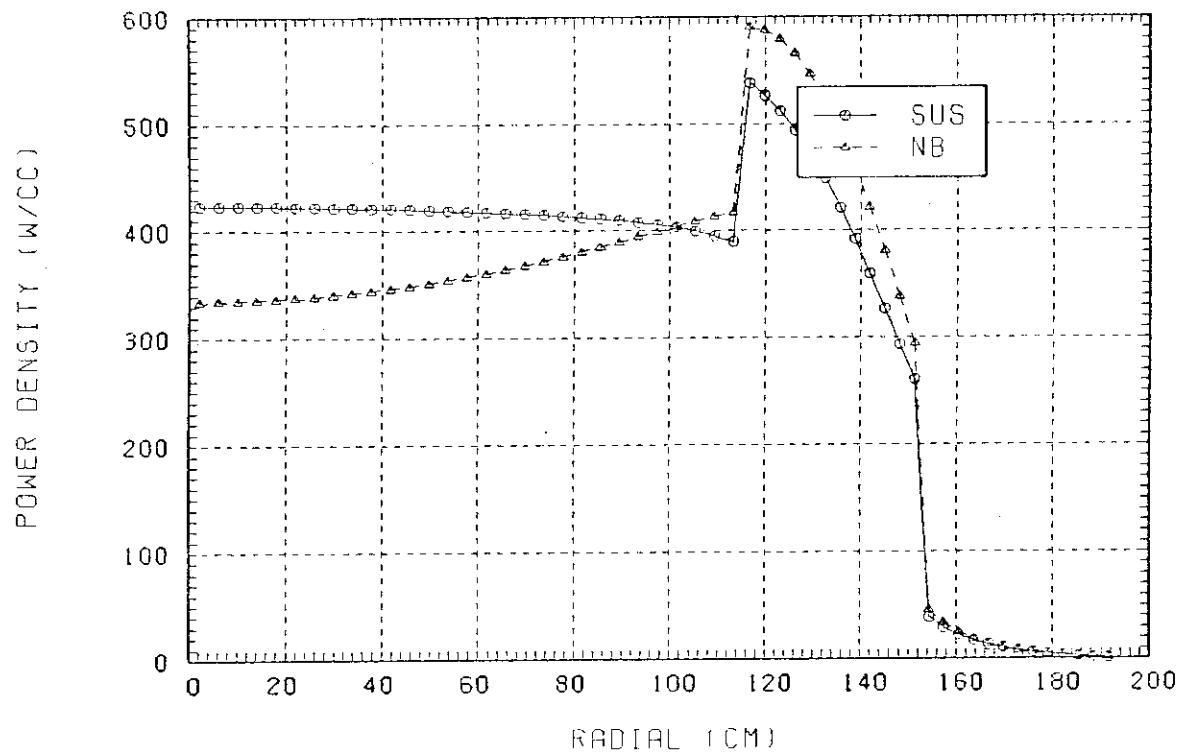


Fig. 3.3-4 Radial Power Distributions of FBR-SS and FBR-Nb

4. FCA XI-1集合体での代替構造材積分実験の予備解析

Na冷却大型高速炉の核特性把握を目的として組まれたFCA XI集合体を用いての、代替構造材核種の核特性実験の可能性について検討する。第3章では基準炉心の全ての不銹鋼を代替構造材にて置換しその核特性への影響を検討したが、FCAの場合、格子管・燃料引出管として、また模擬物質板（Na板或いはPu燃料板）の被覆材として多量の不銹鋼が使用されており、これらを全て代替構造材と置換することは実質的に不可能である。そこで、XI集合体にて用いられている模擬物質板の一部を不銹鋼で置換した集合体を基準系とし、追加された不銹鋼を各代替構造材にて置換してそれぞれの代替構造材の集合体とした。この結果、基準系には体積比にして約30v/oの不銹鋼が存在することになり、この不銹鋼の約24v/oを各代替構造材にて置換することになった。このようにFCAのような臨界集合体を用いて代替構造材核種の核特性の実験を行なう場合、置換し得る代替構造材の量に制限がある。加えて、FCA所有の代替構造材模擬物質の量的制約から、不銹鋼と代替構造材との置換領域の大きさにも制限が課せられることになる。これらの実験上の制約は、Naボイド反応度効果或いはスペクトルインデックス等の測定に際しては置換核種によるスペクトル形成が充分になされる程度に置換核種の量並びに置換領域の大きさを決める必要があるという点で検討しておくべき課題である。そこで本予備解析の主眼は、基準炉心の全ての不銹鋼を代替構造材にて置換した第3章のモデルでの検討結果と、限られた領域において、しかも、不銹鋼の24v/oのみを代替構造材にて置換して得られた本章での結果とを比較しながら、どのような量又は特性が、実験精度を考慮してどの程度の精度で測定できるかを明確にすること、となる。

4.1節にて、FCA XI-1集合体の概要を述べ、4.2節では、代替構造材核種の臨界性に及ぼす影響を考察する。4.3節では、各代替構造材による置換体系での、中性子束のエネルギー依存性及びスペクトルインデックスとして燃料核種の反応率比を取り上げ考察する。4.4節では、代替構造材によるNaボイド反応度効果への寄与を検討する。以上の予備解析から結論される模擬実験の可能性について4.5節にて述べる。

4.1 FCA XI-1集合体の概要と解析モデル

FCA XI-1集合体⁶⁾は、大型高速炉の内側炉心組成を模擬したテスト領域と、系の臨界性を維持するためのドライバー領域とから成る部分的模擬実験体系である。テスト領域は、FM比(fissile to heavy metal ratio)が異なる2種類の燃料引出を交互に配置し、平均的にFM比を0.09程度にして大型高速炉の内側炉心組成を模擬した。テスト領域の等価半径は29.38 cm、炉心高さは91.44 cmで体積は約248 ℥である。FCA XI-1集合体の装荷図をFig. 4.1に示し、テスト領域の2種類の燃料引出T1, T2の装填図をFig. 4.2に示す。テスト領域の周辺部では、外側のドライバー領域の影響を強く受けるが、中心部では大型高速炉の内側炉心をスペクトル的に良く模擬しているので、テスト領域をさらに、テスト領域1(中心

の燃料引出を含む 3 行 3 列の領域；等価半径 9.34 cm) テスト領域 2 とに分割し、実験は主にテスト領域 1 にて行なうこととした。

予備解析を行なった 2 次元円柱計算モデルを Fig. 4.3 に示す。テスト領域 1 (図中の TEST - 1) は燃料引出 T 1 と T 2 を 4 : 5 の割合で、テスト領域 2 (TEST - 2) は T 1, T 2 を 1 : 1 の割合にて混合した。また、制御安全棒を含めたプルトニウムドライバー領域は簡単の為 1 種類のプルトニウムドライバー引出にて代表させた。燃料引出 T 1, T 2 および Fig. 4.3 に示した各領域の平均の原子数密度を Table 4.1 に示す。なお、FCA の格子管、引出管等に使用されている不銹鋼は SUS - 304 系であり Mo は添加されていない。

Fig. 4.3 に示した T 1 および T 2 燃料引出中の天然ウラン板 (NU) およびアルミナ板 (Al_2O_3) を不銹鋼にて置換しこれを基準系とし、さらにこの不銹鋼を代替構造材 V, Ni, Nb, Mo, Ti, Cu, Mn にてそれぞれ置換し、Na ボイド反応度効果を含む核特性の検討を行なった。但し、FCA 所有の代替構造材の量的制約から置換した領域はテスト領域 1 のみである。Table 4.2 に上記の置換を行なったときのテスト領域 1 の原子数密度を示す。以下各体系を区別するために、置換した構造材核種の名を付して XI - 1 (SS), XI - 1 (V) 等々と呼ぶことにする。Table 4.3 に原子数密度の計算を行なうに際して用いた物質データを示す。

4.2 臨界性に関する考察

各体系の実効増倍係数およびそれらの基準系との相違を Table 4.4 に示す。各系共実効増倍係数が 1.0 よりかなり小さいのは、安全性の上から反応度価値を充分大きくするため燃料の濃度を高くした制御安全棒を、それより燃料濃度の低いプルトニウムドライバー燃料にて代表させているためである。各体系を実効増倍係数の大きさの順に並べると XI - 1(V), XI - 1(Ti), XI - 1(SS), XI - 1(Ni), XI - 1(Cu), XI - 1(Mn), XI - 1(Mo), XI - 1(Nb) となり、実効増倍係数の基準系との相違は上記の順にそれぞれ 0.015%, 0.007%, -0.036%, -0.066%, -0.082%, -0.177%, -0.216% となる。Ti の場合を除くと上記の結果は第 3 章にて得られた結果と一致する。第 3 章での考察によると、不銹鋼と Ti との置換による臨界性への影響においてスペクトル変動に伴う ^{239}Pu の α 値の相違の効果が大きいと推定されているが、本章での解析の場合置換領域の大きさが充分でなくスペクトル変化が良く表われていない可能性もある。

4.3 スペクトルインデックスに関する考察

基準系の不銹鋼の約 1 / 4 を各代替構造材核種にて置換した系の中心領域 (等価半径 9.34 cm, 高さ 10.16 cm, Region - I) 中性子束のエネルギー分布を Table 4.5 に示す。また Fig. 4.4 に各エネルギー別に基準系との中性子束の相違を V, Ni および Ti の各系について示す。なお、それぞれの系の中性子束は着目している領域の中でエネルギーに対する合計が 1.0 になるように規格化している。不銹鋼の中で 70 % 以上を占める Fe は第 1 群及び第 2 群に比較的大きな中性子吸収断面積を有する (それぞれ 0.079 barn, 0.028 barn) ので、同様に吸収断面積を有す

る Ni, Cu を除いて、不銹鋼を各代替構造材核種にて置換すると第 1 群、第 2 群の中性子束の割合は大きくなる。また、Fe は第 10 群の弾性除去面積の値が小さい (0.042 barn) ので、第 10 群に比較的大きな弾性除去断面積を有する Ti (3.0 barn), v (2.0 barn), Ni (0.73 barn) にて置換した系では第 10 群の中性子束は小さくなる。その他、Fig. 2.3, 2.4 に示した Fe と代替構造材核種との弾性除去断面積及び中性子吸収断面積の相違に対応した中性子束のエネルギー分布の変化が認められる。次に、中性子エネルギースペクトルの全体的な傾向をみるために、各系について燃料核種の反応率比をテスト領域 1 の中心領域にて計算し、Table 4.6 に示す。スペクトルの硬さ、やわらかさを表わすものとして、 ^{238}U と ^{235}U との核分裂反応率の比 ($F(\text{U}-238)/F(\text{U}-235)$) をとると、基準系と比較して V, Ni の系ではスペクトルが軟化しており、Nb, Mo, Mn の各系ではスペクトルが軟化していることが判る。Ti, Cu の系では $F(\text{U}-238)/F(\text{U}-235)$ の変化は小さい。 $F(\text{U}-238)/F(\text{U}-235)$ の値の大きさの順 (スペクトルの硬い順) に各体系を並べてみると、 $\text{XI-1(Mo)} > \text{XI-1(Mn)} \approx \text{XI-1(Nb)} > \text{XI-1(SS)} > \text{XI-1(Ti)} \approx \text{XI-1(Cn)} > \text{XI-1(Ni)} > \text{XI-1(V)}$ となる。これらの結果を第 3 章での考察と比較すると、 $F(\text{U}-238)/F(\text{U}-235)$ の値自身のみならず、基準系と比較した場合の相対的な大きさの順も異なっている。前節での検討の場合と同様にこの場合も置換領域の大きさが不充分であった可能性がある。

4.4 Na ポイド反応度効果に関する考察

Table 4.7 に各体系での Na ポイド反応度効果の計算値を示す。計算は全て均質モデルによって行なわれており、均質モデルの場合 Na の減速散乱の過大評価により一般的に Na ポイド反応度効果を正の方向に評価すると云われているが、相対的な比較の場合には充分である。ポイド領域の大きさを変え (ケース 1 : 中心から 2 パック分即ち $Z = 0.0$ から 10.16 cm まで (領域 I) をポイドにした。ケース 2 : テスト領域 1 を全て (領域 I + II) ポイドにした。), また、ナトリウムの量 100 % 又は 50 % をポイドにしたそれぞれの場合について、Na ポイド反応度効果を計算した。全てのケースについて基準に採った不銹鋼より Na ポイド反応度効果が小さくなるのはバナジウムを添加したケースのみであり、逆に、ニオブ、モリブデン、マンガンのケースでは Na ポイド反応度効果は大きくなる。ニッケルのケースでは Na ポイド反応度効果は不銹鋼の場合と余り変わらず、チタン、銅の場合にはケースにより大小関係が変化する。Fig. 4.5 に、臨界性と Na ポイド反応度効果との関係を、100 % ポイドの場合について示す。中性子経済の点からも好ましく、又は其程の負担とはならないで且つ、Na ポイド反応度効果の低減化を期待できる代替構造材核種としては、バナジウム、ニッケル、チタンを挙げることができる。

以上みてきた、不銹鋼を各代替構造材にて一部置換した場合の Na ポイド効果に及ぼす影響を、Na ポイドに伴う中性子スペクトルの観点から考察してみる。Fig. 4.6 に基準系 XI-1 (SS) における Na ポイド時 (ポイド領域はテスト領域 1 の中心部 : 領域 I) の中性子束のエネルギー分布の変動の様子を示す。図から明らかな如く、Na を体系から除去すると、Na の 2.3 KeV 近傍 (群数で第 13 群に相当) の大きな共鳴弹性散乱断面積の喪失により、第 13 群以

上の中性子束の割合が増え第14群以下の中性子束の割合が減少する。即ちスペクトルは硬化する。これは、Table 4.6に示したスペクトルインデックス $F(U-238)/F(U-235)$ がNaボイドに伴い5%程大きくなっていることに対応する。一般的にNaボイド反応度効果は正のスペクトル効果と負の中性子漏洩効果の競合により定まるが、炉心中心部におけるNaボイドの場合中性子漏洩項の変化はほぼ零とみなせるので、この場合には正のスペクトル効果のみと考えてよい。正のスペクトル効果の内訳としては、(1)核分裂性物質の α 値 (σ_c/σ_f) の減少、(2)親物質の閾核分裂の増加、(3)構造材核種の中性子吸収の減少等がある。

Table 4.6から、Naの存在する基準状態と、Naを除去したボイド状態との $F(U-238)/F(U-235)$ の変化をみると、いずれの系でも4.7%から5.2% $F(U-238)/F(U-235)$ がボイド状態で大きくなっている（即ちスペクトルが硬化している）、変化の程度はほぼ同じである。このことは、Naボイド時の中性子束のスペクトルの変化分を図示したFig. 4.7からもうかがえる。即ち、Naボイド反応度効果が、基準系と比較して小さくなる XI-1(V)の場合でも、大きくなる XI-1(Nb), XI-1(Mo), XI-1(Mn)の場合でも、基準状態とボイド状態とのスペクトルの変化分は同程度であり、Naボイド反応度効果の大きさは、基準状態での中性子スペクトルが基準系と比較して硬いか軟かいかに対応して決まる。スペクトルが硬い場合には、中性子インポータンスが高エネルギー側にシフトしており、スペクトル硬化に対して正の反応度効果を与える度合が強いと理解することができる。他方、XI-1(Nb), XI-1(Mo), XI-1(Mn)の場合には、不銹鋼との置換物質 Nb, Mo, Mn の中性子吸収断面積が Fe よりも大きく、その分だけ先に挙げた正のスペクトル効果の内、(3)構造材核種の中性子減少の項の度合が大きくなり、同程度のスペクトル変動に対しても Na ボイド効果を正の方向に大きくしていると解釈できる。

ケース1の100%ボイドに対する反応度効果を、その大きさの順に並べると XI-1(Mn) \approx XI-1(Mo) \approx XI-1(Nb) $>$ XI-1(Ti) $>$ XI-1(Cu) \approx XI-1(SS) $>$ XI-1(Ni) $>$ XI-1(V) であり、ケース2の100%ボイドの場合には XI-1(Nb) $>$ XI-1(Mo) $>$ XI-1(Mn) $>$ XI-1(Cn) $>$ XI-1(Ni) \approx XI-1(Ti) \approx XI-1(SS) $>$ XI-1(V) となる。これらの結果は Ti の場合を除くとほぼ第3章の考察と一致する。

4.5 実験体系選定と実験項目

FCA XI-1集合体では、制御棒のストローク 50 mm に相当する反応度変化を $1\rho_0$ (= 0.062% $\Delta k/k$) とし、制御棒の移動距離にて反応度に換算している。分離密着を伴う臨界点の測定誤差は $\pm 0.014\rho_0$ (= $\pm 0.00087\% \Delta k/k$) 程度であり、Table 4.4に示した代替構造材による不銹鋼の置換に伴う反応度変化を最も反応度変化の小さい Ti の場合を含めて充分な精度にて測定することができる。スペクトルインデックスとして $F(U-238)/F(U-235)$ をとると、Table 4.6から置換による $F(U-238)/F(U-235)$ の変動は高々 2% 程度であり、有意な差として測定するのは非常に困難である。Naボイド反応度効果の場合、密着状態にて測定した場合の測定誤差は $\pm 0.004\rho_0$ (= $\pm 0.00025\% \Delta k/k$) であり、Naボイド反応度効果自身はケース1の場合でも充分な精度にて測定できるが、各置換物質による Na ボイド

反応度効果の相違を、有意な差として測定するのは容易ではない。

以上の考察に基づき、実験体系と実験項目を以下のように定めた：

(1) 代替構造材による不銹鋼の置換領域は

Fig. 4.3 の TEST-1 領域に相当する大きさとする。但し、所有量に余裕のある構造材核種 Mn, Ti, Ni, Cn については、置換領域を拡大した(等価半径 15.57cm)ケースをも考慮する。

(2) Na ボイド反応度効果については、ボイド領域を Fig. 4.3 にて軸方向高さを 15.24 cm まで大きくする。これは、測定すべき反応度効果をなるべく大きくするということと、スペクトル効果を重点的にみるため、ボイド領域はなるべく中心部が望ましいという 2 つの要請を考慮した結果である。また、スペクトル効果の相違を主に測定するために、Na ボイド反応度効果の軸方向分布を測定する。

(3) 同一の体系 XI-1 Ref にて全ての代替構造材核種の中心サンプルワースを測定する。

(4) 不銹鋼を各代替構造材にて置換した各体系について、Pu を始めとする燃料物質および天然 B₄C のサンプルワースを測定する。

(5) スペクトルインデックスについては、当初、XI-1 (SS), XI-1 (Nb), XI-1 (Mn) の各体系について測定し、置換領域を拡大した体系での再測定を考慮に入れる。

Table 4.1 Homogeneous atomic number densities of FCA
XI - 1 assembly

(10^{24} atom • cm $^{-3}$)

Region Nuclide \	T 1 - drawer	T 2 - drawer	TEST - 1 (T1/T2=4/5)	TEST - 2 (T1/T2=1/1)	Pu Driver (PD (92))
Pu - 239	5.2290 - 4	1.0458 - 3	8.1439 - 4	7.8434 - 4	2.0916 - 3
Pu - 240	4.6647 - 5	9.3294 - 5	7.2562 - 5	6.9971 - 5	1.8659 - 4
Pu - 241	4.7309 - 6	9.4617 - 6	7.3591 - 6	7.0963 - 6	1.8923 - 5
U - 235	3.2900 - 5	1.5185 - 5	2.3058 - 5	2.4043 - 5	1.5185 - 5
U - 238	9.3449 - 3	6.9056 - 3	7.9898 - 3	8.1253 - 3	6.9056 - 3
O	1.5598 - 2	1.7286 - 2	1.6536 - 2	1.6442 - 2	1.3911 - 2
Na	8.2960 - 3	8.2960 - 3	8.2960 - 3	8.2960 - 3	8.2960 - 3
A ℓ	1.1249 - 3	2.2498 - 3	1.7499 - 3	1.6874 - 3	0.0
Cr	3.2257 - 3	3.3890 - 3	3.3164 - 3	3.3073 - 3	3.7155 - 3
Fe	1.1849 - 2	1.2427 - 2	1.2170 - 2	1.2138 - 2	1.3581 - 2
Ni	1.3781 - 3	1.5084 - 3	1.4505 - 3	1.4433 - 3	1.7691 - 3

Region Nuclide \	EU Driver (EUD)	Ax. Blanket 1 (DUP)	Ax. Blanket 2 (NUB)	Red. Blanket (DUB)
U - 235	2.8483 - 3	3.2900 - 5	2.8900 - 4	8.6000 - 5
U - 238	6.8914 - 3	9.3449 - 5	3.9885 - 2	4.0070 - 2
O	1.3499 - 2	1.7286 - 2	0.0	0.0
Na	8.2960 - 3	8.2960 - 3	0.0	0.0
A ℓ	8.9993 - 3	2.2498 - 3	0.0	0.0
Cr	3.1340 - 3	3.0624 - 3	1.827 - 3	1.827 - 3
Fe	1.1504 - 2	1.1272 - 2	6.652 - 3	6.652 - 3
Ni	1.4020 - 3	1.2478 - 3	7.960 - 4	7.960 - 3

($5.2290 - 4 : 5.2290 \times 10^{-4}$)

Table 4.2 Homogeneous atomic number densities of
TEST-1 region of FCA XI-1 assembly

(10^{24} atom \cdot cm $^{-3}$)

Model Nuclide	XI-1(SS)	XI-1(V)	XI-1(Ni)	XI-1(Nb)
Pu - 239	8.1439 - 4			
Pu - 240	7.2562 - 5			
Pu - 241	7.3591 - 6			
U - 235	1.5185 - 5			
U - 238	6.9057 - 3			
O	1.3911 - 2			
Na	8.2960 - 3			
Aℓ	1.7499 - 3			
Cr	4.3713 - 3	3.3164 - 3	3.3164 - 3	3.3164 - 3
Fe	1.5999 - 2	1.2170 - 2	1.2170 - 2	1.2170 - 2
Ni	1.8970 - 3	1.4505 - 3	7.2906 - 3	1.4505 - 3
V	0.0	4.4897 - 3	0.0	0.0
Nb	0.0	0.0	0.0	3.5227 - 3

Model Nuclide	XI-1(Mo)	XI-1(Ti)	XI-1(Cu)	XI-1(Mn)
Pu - 239				
Aℓ				
Cr	3.3164 - 3	3.3164 - 3	3.3164 - 3	3.3164 - 3
Fe	1.2170 - 2	1.2170 - 2	1.2170 - 2	1.2170 - 2
Ni	1.4505 - 3	1.4505 - 3	1.4505 - 3	1.4505 - 3
Mo	3.6591 - 3	0.0	0.0	0.0
Ti	0.0	3.6603 - 3	0.0	0.0
Cu	0.0	0.0	5.4772 - 3	0.0
Mn	0.0	0.0	0.0	5.1772 - 3

($8.1439 - 4 : 8.1439 \times 10^{-4}$)

Table 4.3 Density and atomic mass weight of structure material

Material	Density (g · cm ⁻³)	Mass weight (a · m · u)
Vanadium (V)	5.87	50.9414
Nickel (Ni)	8.8	58.71
Niobium (Nb)	8.4	92.9064
Molybdenum (Mo)	9.01	95.94
Titanium (Ti)	4.5	47.90
Copper (Cu)	8.933	63.546
Manganese (Mn)	7.3	54.938

Table 4.4 Multiplication factor Keff

Model	Keff	(K ₁ - K ₀) / K ₀ (%)
XI-1 (SS)	0.97507	
XI-1 (V)	0.97522	0.015
XI-1 (Ni)	0.97472	-0.036
XI-1 (Nb)	0.97296	-0.216
XI-1 (Mo)	0.97334	-0.177
XI-1 (Ti)	0.97514	0.007
XI-1 (Cu)	0.97443	-0.066
XI-1 (Mn)	0.97427	-0.082

(K₀ : Multiplication factor of XI-1 (SS) model)

Table 4.5 Energy distribution of neutron flux in the region - I
of TEST 1

Model Group	XI-1 (SS)	XI-1 (V)	XI-1 (Ni)	XI-1 (Nb)	XI-1 (Mo)
1	1.780 - 3	1.817 - 3	1.783 - 3	1.806 - 3	1.797 - 3
2	8.278 - 3	8.441 - 3	8.263 - 3	8.365 - 3	8.372 - 3
3	2.058 - 2	2.077 - 2	2.045 - 2	2.047 - 2	2.058 - 2
4	4.361 - 2	4.433 - 2	4.372 - 2	4.266 - 2	4.327 - 2
5	6.341 - 2	6.392 - 2	6.404 - 2	6.260 - 2	6.325 - 2
6	9.910 - 2	9.925 - 2	1.001 - 1	1.006 - 1	1.002 - 1
7	1.483 - 1	1.422 - 1	1.465 - 1	1.511 - 1	1.501 - 1
8	1.466 - 1	1.502 - 1	1.492 - 1	1.501 - 1	1.493 - 1
9	1.448 - 1	1.445 - 1	1.437 - 1	1.464 - 1	1.456 - 1
10	1.388 - 1	1.217 - 1	1.303 - 1	1.380 - 1	1.381 - 1
11	8.021 - 2	7.296 - 2	8.402 - 2	8.028 - 2	8.080 - 2
12	3.926 - 2	4.014 - 2	3.869 - 2	3.869 - 2	3.906 - 2
13	2.485 - 2	3.431 - 2	2.631 - 2	2.290 - 2	2.328 - 2
14	2.263 - 2	2.898 - 2	2.378 - 2	2.005 - 2	2.067 - 2
15	1.113 - 2	1.337 - 2	1.184 - 2	1.018 - 2	9.363 - 3
16	4.690 - 3	5.390 - 3	5.061 - 3	4.111 - 3	4.418 - 3
17	1.580 - 3	1.743 - 3	1.729 - 3	1.319 - 3	1.355 - 3
18	3.712 - 4	3.971 - 4	4.161 - 4	3.044 - 4	2.952 - 4
19	8.527 - 5	8.918 - 5	9.689 - 5	6.871 - 5	6.242 - 5
20	1.258 - 5	1.295 - 5	1.441 - 5	1.005 - 5	8.941 - 6
21	2.162 - 6	2.205 - 6	2.465 - 6	1.730 - 6	1.566 - 6
22	9.849 - 7	9.815 - 7	1.121 - 6	8.096 - 7	7.489 - 7
23	1.965 - 7	1.929 - 7	2.228 - 7	1.614 - 7	1.498 - 7
24	2.331 - 8	2.175 - 8	2.771 - 8	1.822 - 8	1.687 - 8
25	5.070 - 10	4.423 - 10	6.518 - 10	3.634 - 10	3.351 - 10

Table 4.5 Energy distribution of neutron flux in the region - I
of TEST 1 (continued)

Model Group \ Model	XI-1 (Ti)	XI-1 (Cu)	XI-1 (Mn)
1	1.817-3	1.770-3	1.789-3
2	8.483-3	8.197-3	8.367-3
3	2.100-2	2.025-2	2.084-2
4	4.415-2	4.364-2	4.426-2
5	6.395-2	6.316-2	6.406-2
6	9.997-2	9.948-2	9.934-2
7	1.485-1	1.486-1	1.449-1
8	1.477-1	1.485-1	1.487-1
9	1.438-1	1.439-1	1.473-1
10	1.163-1	1.361-1	1.336-1
11	8.539-2	8.111-2	8.450-2
12	4.680-2	4.093-2	4.316-2
13	2.830-2	2.376-2	1.449-2
14	2.506-2	2.348-2	2.545-2
15	1.191-2	1.081-2	1.231-2
16	4.876-3	4.423-3	4.872-3
17	1.601-3	1.484-3	1.574-3
18	3.652-4	3.448-4	3.573-4
19	8.233-5	7.854-5	7.925-5
20	1.199-5	1.149-5	1.135-5
21	2.048-6	1.963-6	1.897-6
22	9.158-7	8.940-7	8.151-7
23	1.801-7	1.766-7	1.543-7
24	2.022-8	2.032-8	1.659-8
25	4.081-10	4.243-10	3.239-10

Table 4.6 Reaction rate ratios in the region - I of TEST 1

		F (U-238)	C (U-238)	F (Pu-239)
		F (U-235)	F (U-235)	F (U-235)
XI-1 (SS)	Na full	0.01931	0.1465	0.8973
	Na void	0.02027	0.1435	0.9057
XI-1 (V)	Na full	0.01886	0.1470	0.8851
	Na void	0.01984	0.1444	0.8933
XI-1 (Ni)	Na full	0.01908	0.1479	0.8957
	Na void	0.02007	0.1452	0.9047
XI-1 (Nb)	Na full	0.01953	0.1457	0.9033
	Na void	0.02044	0.1426	0.9119
XI-1 (Mo)	Na full	0.01966	0.1460	0.9025
	Na void	0.02061	0.1431	0.9120
XI-1 (Ti)	Na full	0.01927	0.1469	0.8894
	Na void	0.02026	0.1439	0.8986
XI-1 (Cu)	Na full	0.01926	0.1467	0.8970
	Na void	0.02020	0.1439	0.9060
XI-1 (Mn)	Na full	0.01953	0.1489	0.9009
	Na void	0.02049	0.1468	0.9093

Table 4.7 Comparison of sodium void reactivity worth

 $(10^{-2} \% \Delta k / k k')$

Model	Case 1		Case 2	
	100 % Void	50 % Void	100 % Void	50 % Void
XI - 1 (SS)	3.05	1.47	6.20	3.05
XI - 1 (V)	2.84 (- 6.9)	1.37 (- 6.8)	5.67 (- 8.6)	2.52 (- 17.4)
XI - 1 (Ni)	2.95 (- 3.3)	1.47 (0.0)	6.21 (0.2)	2.95 (- 3.3)
XI - 1 (Nb)	3.48 (14.1)	1.58 (- 7.5)	7.81 (26.0)	3.75 (21.3)
XI - 1 (Mo)	3.48 (14.1)	1.79 (21.8)	7.59 (22.4)	3.90 (27.9)
XI - 1 (Ti)	3.26 (- 6.9)	1.58 (- 7.5)	6.20 (0.0)	3.05 (0.0)
XI - 1 (Cu)	3.05 (0.0)	1.37 (- 6.8)	6.84 (10.3)	3.26 (- 6.9)
XI - 1 (Mn)	3.48 (14.1)	1.58 (- 7.5)	7.26 (17.1)	3.69 (21.0)

Figures in parenthesis are the differences of multiplication factor of each model from the reference model, XI - 1 (SS), in unit of per - cent.

Case 1 : Na was removed from the region - I of TEST 1 (see Fig. 4.3)

Case 2 : Na was removed from both of the region - I and - II of TEST 1.

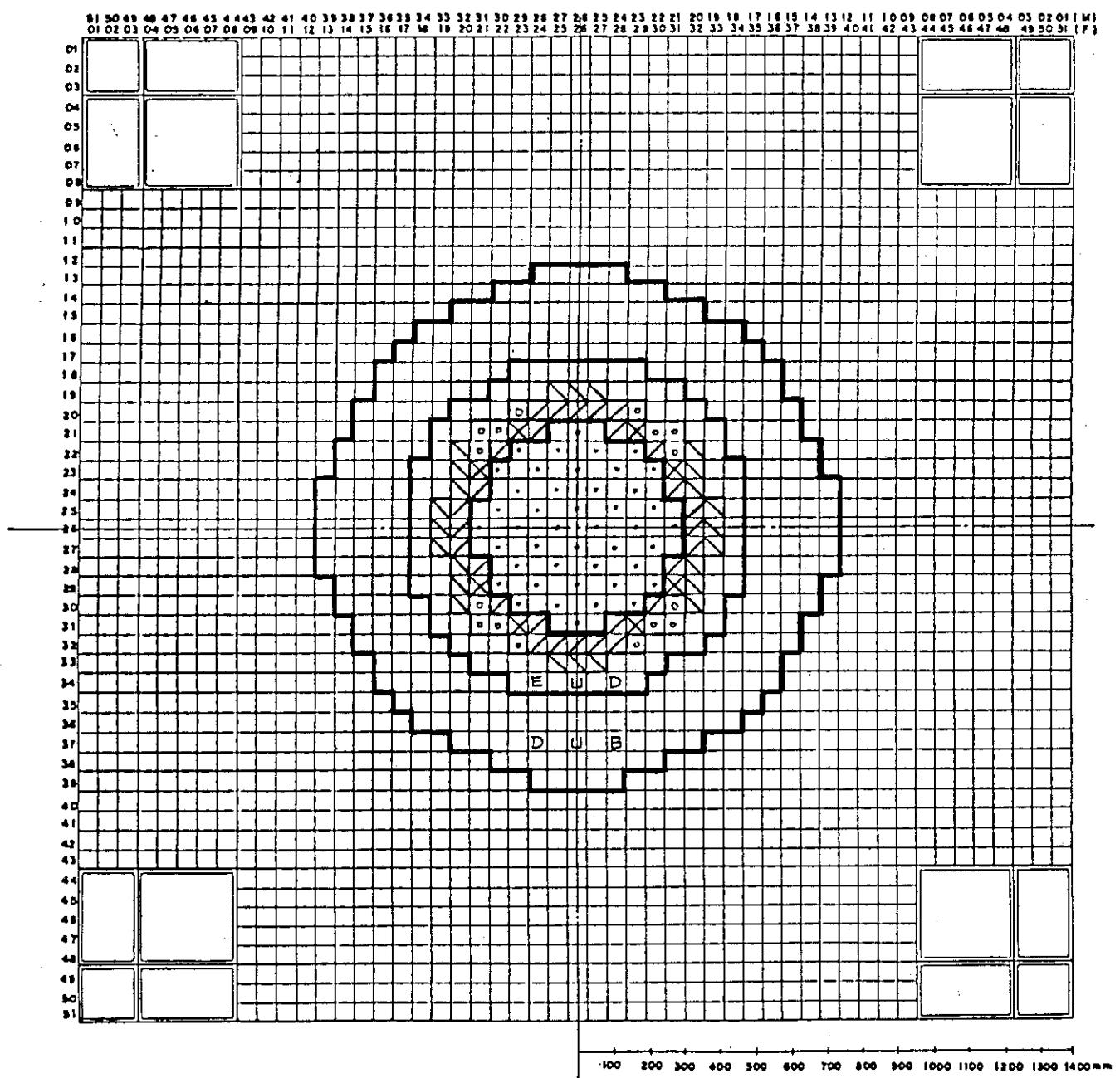


Fig. 4.1 Loading pattern of FCA XI-I assembly (fixed side)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													

(1) T1-Drawer

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													

(2) T2-Drawer

Fig. 4,2 Plate configuration of T1- and T2-drawer of FCA XI-1 assembly

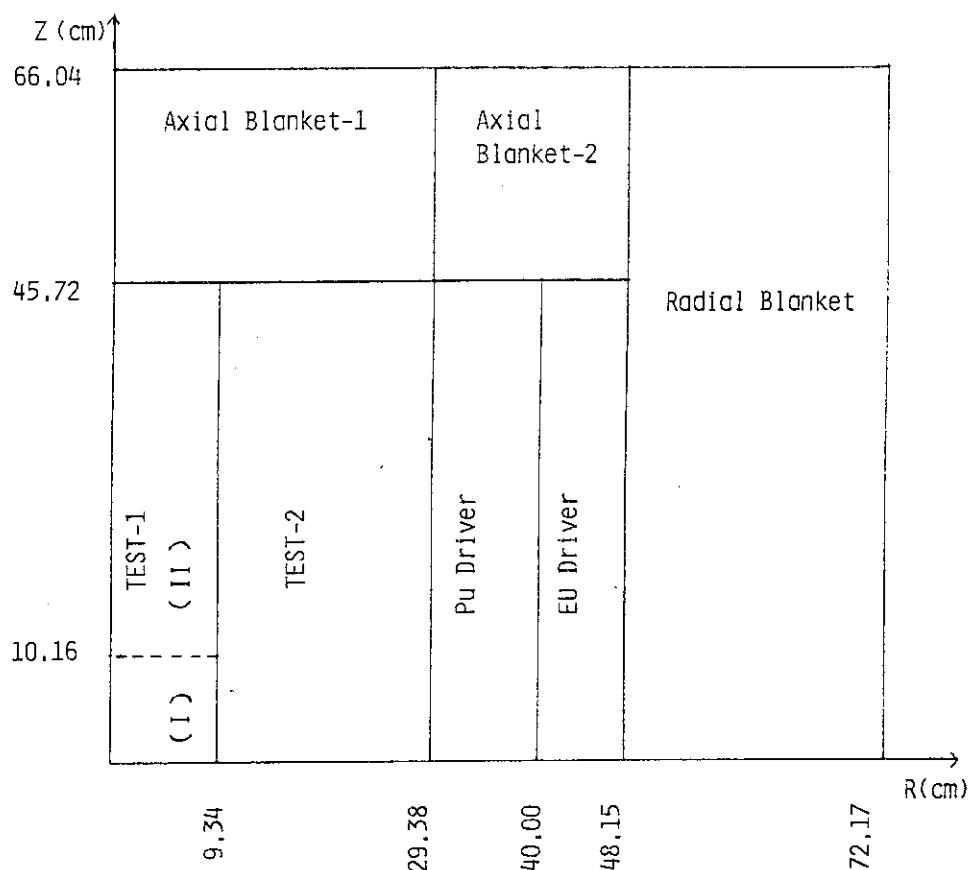


Fig. 4.3 R-Z configuration of FCA XI-1 Assembly

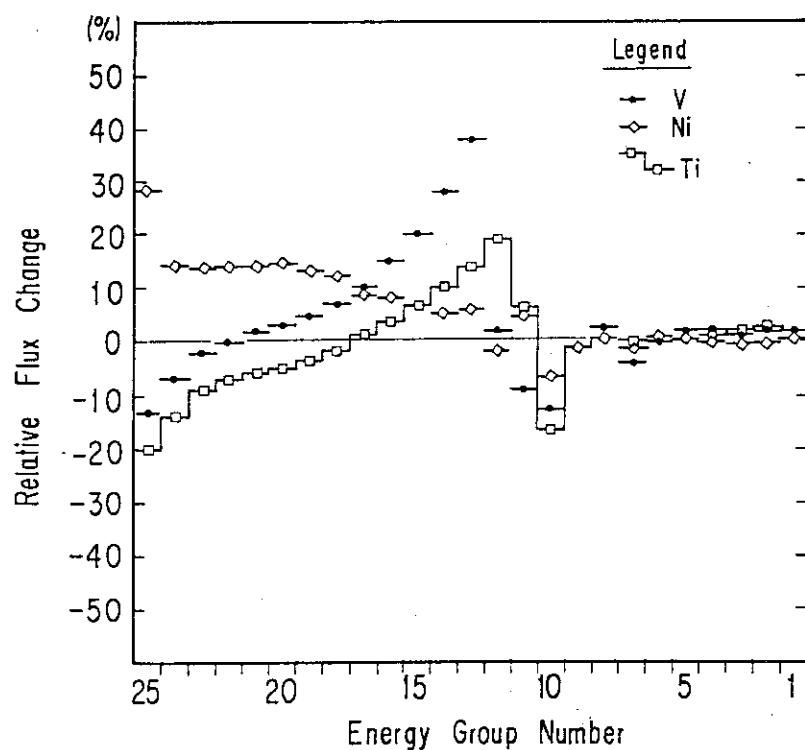
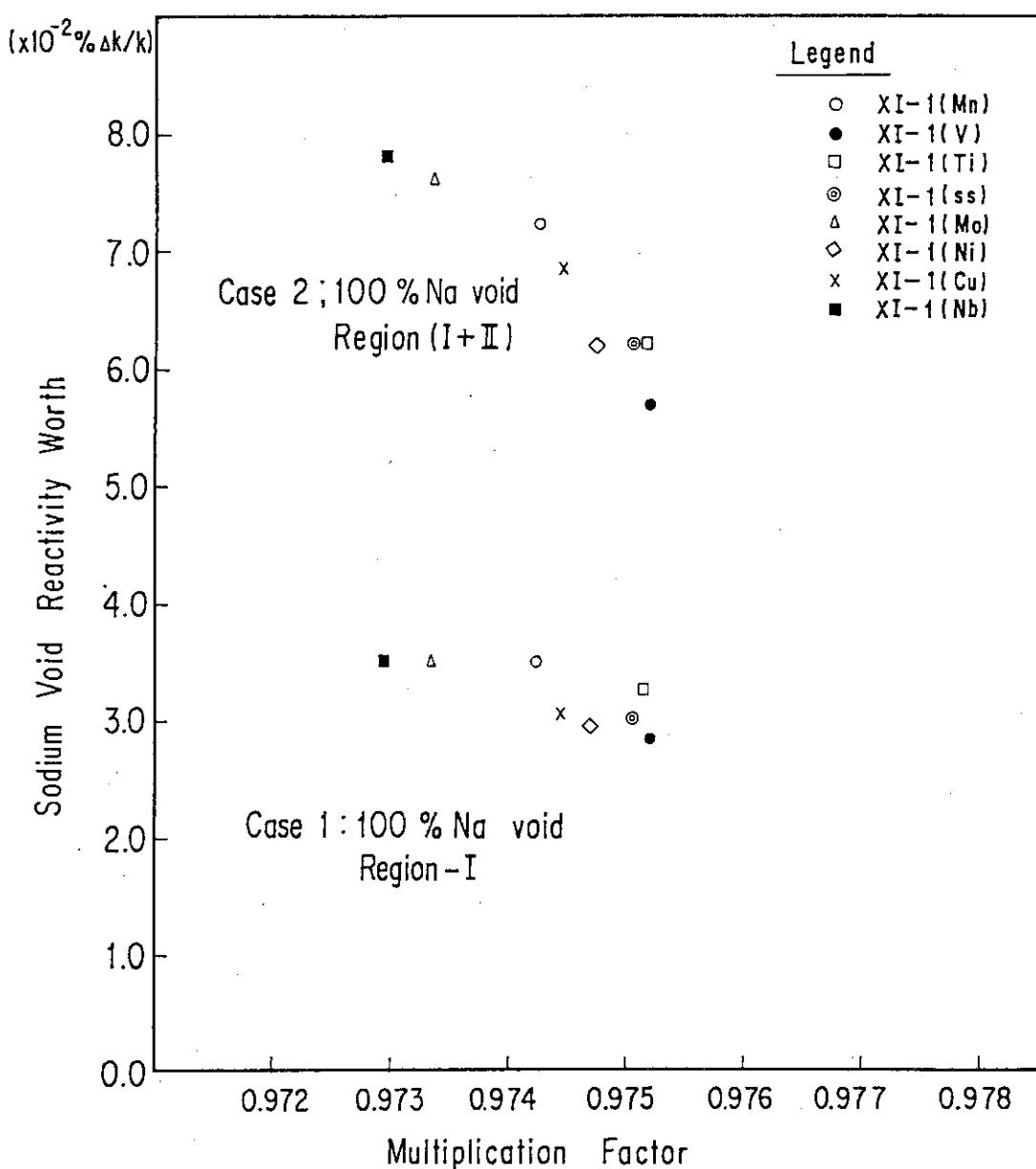


Fig. 4.4 Neutron flux change due to partial replacement of stainless steel by V, Ni and Ti in region-I of TEST-1



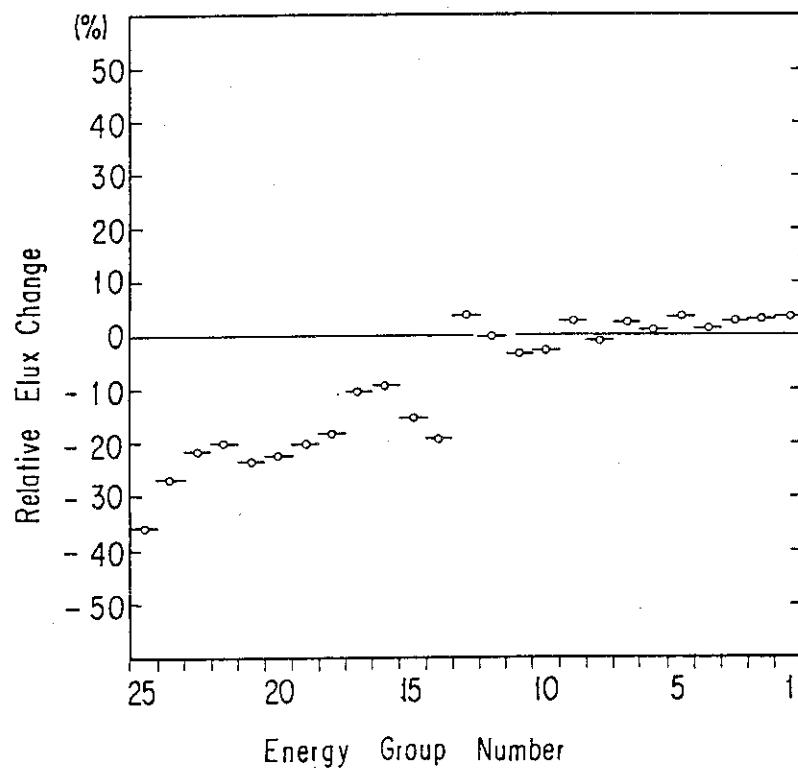


Fig. 4.6 Neutron flux change due to Na voiding in region - I
of TEST 1 of XI-1(ss) model

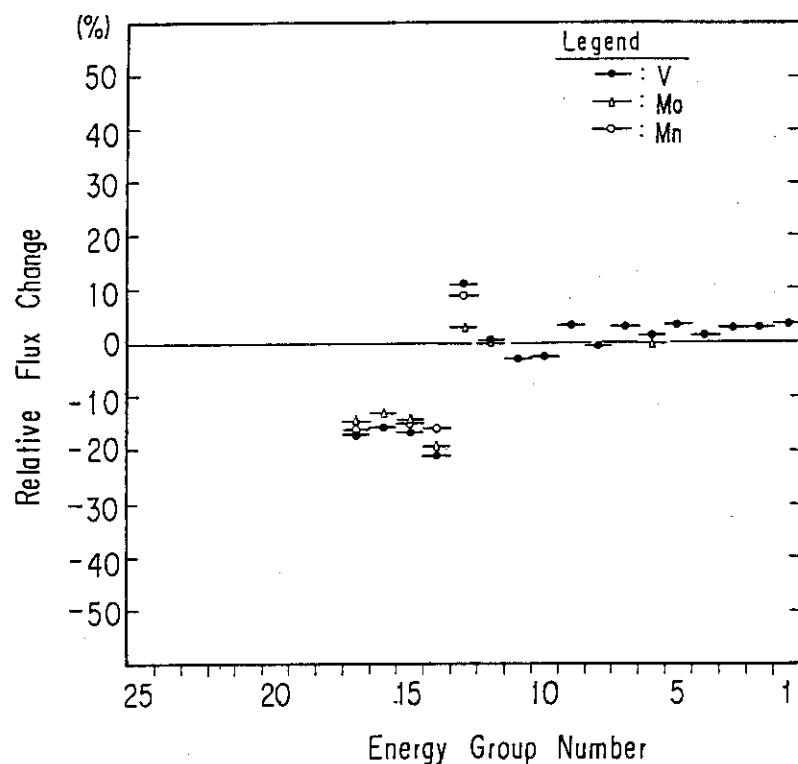


Fig. 4.7 Neutron flux changes due to Na voiding in region - I
of TEST 1 of XI-1(V), XI-1(Mo) and XI-1 (Mn) models

5. 結 言

不銹鋼に代る代替構造材核種を燃料ピン被覆管、燃料集合体ラッパ管等に使用した場合の大型炉心高速炉の核特性に与える影響について検討した。代替構造材核種としては、V, Ni, Ti, Mo, Nb, Cu, Mn を選び、Na ボイド反応度効果を中心に臨界性、燃焼特性、増殖性等の諸特性について検討を加え以下の結論を得た。

- (1) 臨界性の観点から、すなわち、系に高い実効増倍率を与える核種の順番は；

$$\text{Ti} > \text{V} > \text{不銹鋼} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Nb}$$

となる。これらの臨界性の相違は構造材核種自身の中性子吸収特性に依存している。燃焼による反応度損失についてみると、 $\text{Ti} < \text{不銹鋼} < \text{V} < \text{Ni}$ となり、他の核種の場合は全て反応度損失が不銹鋼より大きくなつた。

- (2) 増殖性の順位は；

$$\text{Ti} > \text{不銹鋼} \cong \text{V} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Mo} > \text{Nb}$$

となつた。

- (3) 正の Na ボイド反応度低減化に資する構造材は；

$$\text{V} > \text{Ni} > \text{Ti} > \text{不銹鋼} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Nb} > \text{Mo}$$

の順になつた。

以上の検討結果より、V, Ti, Ni は臨界性、増殖性、Na ボイド反応度効果の観点から不銹鋼と匹敵するかあるいはよりすぐれた構造材となりうることを確認した。

構造材の炉物理特性を明確に、また、上述のすぐれた特性を実験的に検証するために、FCA XI-1 集合体を用いての積分実験の可能性について検討した。この際 FCA での代替構造材核種の所有量、実験精度を考慮して以下の実験項目を選定した。

- (1) 不銹鋼と代替構造材との置換領域の大きさは、テスト領域の中央部にて等価半径が 9.34 cm、体積は 25 ℥とする。所有量に余裕のある核種については置換領域を拡大する。
- (2) 測定すべき項目として以下の如く選定した；

Na ボイド反応度効果：中心および軸方向分布。

中心サンプルワース：各構造材核種および、Pu, HEU, NU, DUO₂ および天然 B₄C。
スペクトルインデックス：²³⁸U と ²³⁵U との核分裂反応率比。

謝 辞

本実験の計画に際し、高速炉物理研究室の中野正文氏に代替構造材核種の選択・準備等に御協力戴き、また、実験項目につき御討論して戴きました。ここに感謝致します。

5. 結 言

不銹鋼に代る代替構造材核種を燃料ピン被覆管、燃料集合体ラッパ管等に使用した場合の大型炉心高速炉の核特性に与える影響について検討した。代替構造材核種としては、V, Ni, Ti, Mo, Nb, Cu, Mn を選び、Na ボイド反応度効果を中心に臨界性、燃焼特性、増殖性等の諸特性について検討を加え以下の結論を得た。

(1) 臨界性の観点から、すなわち、系に高い実効増倍率を与える核種の順番は；

$$\text{Ti} > \text{V} > \text{不銹鋼} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Nb}$$

となる。これらの臨界性の相違は構造材核種自身の中性子吸収特性に依存している。燃焼による反応度損失についてみると、 $\text{Ti} < \text{不銹鋼} < \text{V} < \text{Ni}$ となり、他の核種の場合は全て反応度損失が不銹鋼より大きくなつた。

(2) 増殖性の順位は；

$$\text{Ti} > \text{不銹鋼} \cong \text{V} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Mo} > \text{Nb}$$

となつた。

(3) 正の Na ボイド反応度低減化に資する構造材は；

$$\text{V} > \text{Ni} > \text{Ti} > \text{不銹鋼} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Nb} > \text{Mo}$$

の順になつた。

以上の検討結果より、V, Ti, Ni は臨界性、増殖性、Na ボイド反応度効果の観点から不銹鋼と匹敵するかあるいはよりすぐれた構造材となりうることを確認した。

構造材の炉物理特性を明確に、また、上述のすぐれた特性を実験的に検証するために、FCA XI-1 集合体を用いての積分実験の可能性について検討した。この際 FCA での代替構造材核種の所有量、実験精度を考慮して以下の実験項目を選定した。

(1) 不銹鋼と代替構造材との置換領域の大きさは、テスト領域の中央部にて等価半径が 9.34 cm、体積は 25 ℥とする。所有量に余裕のある核種については置換領域を拡大する。

(2) 測定すべき項目として以下の如く選定した；

Na ボイド反応度効果：中心および軸方向分布。

中心サンプルワース：各構造材核種および、Pu, HEU, NU, DUO₂ および天然 B₄C。
スペクトルインデックス：²³⁸U と ²³⁵U との核分裂反応率比。

謝 辞

本実験の計画に際し、高速炉物理研究室の中野正文氏に代替構造材核種の選択・準備等に御協力戴き、また、実験項目につき御討論して戴きました。ここに感謝致します。

参 考 文 献

- (1) Chin B. A., Nenhold R. J. and Straalsund J. L. : Nucl. Technol., 57, 426 (1982).
- (2) Takano H., Hasegawa A., Nakagawa M., Ishiguro Y. and Katsuragi S. : JAERI 1225, "JAERI Fast Reactor Group Constants Set, Version II" (1978).
- (3) Tone T. et al. : JAERI 1192, "PROF-GROUCH-G : A Processing Code for Group Constants for a Fast Reactor" (1970).
- (4) O'Dell R.D. and Hиронс T.J. : LA-4231, "PHENIX A Two-Dimensional Diffusion Burnup - Refueling Code" (1970).
- (5) Takano H. and Ishiguro Y. : JAERI-M 82-135, "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2" (1982).
- (6) 大杉俊隆 他, to be published.