

1988年炉物理国際会議および断面積調整 専門家会議における断面積関係の研究紹介

(阪大・工) 竹田 敏一

1988年炉物理国際会議はANS(炉物理部門)の主催, 日本原子力学会の共催のもと米国 Wyoming Jackson-Hole で1988年9月18~22日に開催された。参加者は270名であり, 日本からも39名が出席した。発表論文数は全部で178件であった。また, この国際会議のすぐ後に同一の場所で断面積調整に関するNEACRP専門家会議が開催された。この両会議における断面積関係の研究について紹介する。

1988年炉物理国際会議

初日の19日午前中の各国の炉物理研究の概要の発表のほかは, 3つのパラレルセッションに分かれて発表が行われた。表1に示すように, 核データI及びIIのセッションで17件の論文が発表された。

セッションIではENDF/B-VIの評価現状, JEF-Iのベンチマークテスト, JEF-IIの現状, JENDL-3Tのベンチマークテスト, 及び ^{238}U と ^{235}U の共鳴領域の評価についての発表があった。ENDF/B-VIの評価は完了間近である。同時評価の採用により主要核種での改善がみられ, 100 keV以上で ^{235}U , ^{239}Pu の核分裂, および ^{238}U 捕獲断面積が小さめになったとのことである。JEF-Iのベンチマークテストが, PROTEUS, MASURCA, PHENIX, SUPER-PHENIX等のデータを使って行われ, ^{238}U 捕獲断面積が非分離領域で低すぎる, ^{235}U 非弾性散乱断面積に問題がある等, 再評価への多くの指針が得られ, 来年半ば完了をめざして現在再評価中である。JENDL-3Tのベンチマークテストは感度解析により行ったもので, 高速炉の核特性のC/E値はJENDL-2に比べ1からずれると報告された。

セッションIIではJEF-IIにおける ^{238}U の非分離共鳴断面積の評価法, 高速炉解析に対する断面積処理法, 大型高速炉炉心特性の予測誤差, 等に関する発表があった。JEF-IIで, ^{238}U の断面積が新しい核反応理論に基づいて評価され, 非分離共鳴領域(10~300 keV)での捕獲断面積についてENDF/B-VIの新しい傾向とよく一致する結果が得られた(JENDL-3はこれより約5%大きめになっている)。また, 炉心特性の予測精度を高めるためにバイアス法と断面積調整法を組み合わせる方法が提案され, 特に制御棒値の予測に有効なことが報告された。

両セッションでは, 特に炉心特性に対する精度を断面積の立場から詳細に議論され興味があ

った。

断面積調整に関するNEACRP専門家会議

本会議は Jackson Hole での 1988 年国際炉物理会議の後、同一場所 (Snow-King-Resort) で 9 月 23 日、24 日の両日開催された。参加者は米国 13 名、日本 6 名、フランス 4 名、カナダ 2 名、イタリア 2 名、英国 1 名、スイス 1 名、その他 NEA データバンク 1 名であり、少人数であったため専門的な議論がなされた。なお、日本からの参加者は亀井 (NAIG)、大竹 (ISL)、中島、三田、白方 (PNC)、竹田 (阪大) の 6 名である。表 2 に 2 日間のスケジュールを示す。以下にフランス、日本、アメリカ、英国の断面積調整の研究概略について述べる。

フランスでは CARNIVAL-IV の作成のため、いわゆるクリーンコアの積分データを使用した。種々の中性子スペクトルを考慮するため $r = \frac{\nu \Delta f / \epsilon \Delta s}{\dots}$ なるパラメータを用い、種々の r 値をもつ炉心を考えた。一例として図 1 には r と材料バックリングの関係が示されており、炉心が大きくなると r が小さくなることがわかる。調整された断面積を用い計算値 (C) と実験値 (E) との差を図 2 のようにパラメータ r の関数として評価し、これを Super-Phenix の設計等にバイアスとして用いている。調整には Mockup Critical で測定した制御棒反応度値や Na ボイド反応度を含めていない。これは計算誤差が大きいことが予想されるためである。Super-Phenix に調整された断面積を適用し、それにバイアスを施し核特性量を推定した結果と、スタートアップ時の実験値とを比較すると、臨界性に対する一致は良好であったが、制御棒反応度は計算値が約 10% 過大評価していた。フランスでは現在、この差を断面積から調べている。特に構造材である Fe に対して、CARNIVAL-IV は 100 keV 以上で、捕獲断面積を 50% 程度、輸送断面積を 25% 過小評価されていることが分かった。さらに ~400 keV での酸素の輸送断面積は、前方散乱効果が考慮されていないので 10~15% 過小評価されている。また、 ^{10}B の捕獲断面積も ~200 keV 以上で 10% ほど大きすぎることが指摘されている。もし、これらの補正を施せば制御棒反応度値の計算値は約 5% 減少することが感度解析により予想されている。

CARNIVAL-IV はクリーン炉心の特性を用いて調整したので FBR 設計上重要な燃焼反応度損失等については調整の対象になっていない。その精度を検証し、目標精度要求を満足させるためにはどのようにすれば良いかを考える必要がある。燃焼特性に対する基礎積分データとしてフランスでは、

- 1) MAZURCA 装置を用いた BALZAC プログラムの HI (heavy isotopes) 実験標準中心燃料ゾーンを異なる Pu ベクトルの燃料と置換し反応度を測定
- 2) Phenix 炉における純粋なアイソトープの照射実験
RROFIL プログラム
- 3) Phenix 炉における 6 サイクル照射した MOX 燃料ピンの組成を測定した TRAPU プロ

グラム

がある。1) の実験では特に Pu の核分裂及び捕獲断面積, 2) では捕獲断面積が反応度に主な寄与をする。これらの測定データを CARNIVAL-IV による計算結果と比較し, 一応の一致は得た。このデータにより CARNIVAL-IV を調整するのは理論的に問題があるが, 一群でのテスト調整を行いどの程度断面積が変わり, それが燃焼反応度特性の不確かさに与える影響が調べられた。Super-Phenix の 1 サイクルの燃焼度約 3% のうち重核は約 0.7% の寄与をするが, 0.7% のうち 26% が不確かであるのが表 3 に示されている。BALZAC, RROFIL, TRAPU のデータを全部用いると不確かさが 9% に減じる。このことから, これらのデータが非常に有効であることがわかる。調整による断面積の変化を表 4 に示す。²³⁸U の核分裂及び捕獲断面積が増加し, 散乱断面積が減少しているのが特徴である。今後の断面積調整関連の研究として JEF-II file の新たな調整及び積分データに取り入れるべき以前のクリーン実験の測定値の整理, Super-Phenix データの整理, CONRAD プログラムによる測定データの取得が予定されている。

英国からは Rowlands が調整済み断面積 file FGL5 を作成した際の経験について述べた。英国では調整をアジャストといわずに断面積のフィッティングと呼んでおりエネルギー群 10 群での broad group で, 断面積のスケーリング因子を求め ²³⁸U 共鳴パラメータ等のアジャストを行った。FGL5 を用いると制御棒反応度は ± 5%, Na ボイド反応度は ± 5%, ドップラー反応度は ± 15%, 反応率は ± 2% で予測できるとのことである。

アメリカでは ANL を中心として最近断面積アジャストメントが精力的に行われている。これは, アメリカではこれまでの酸化燃料高速炉に変わり金属燃料 LMR の開発が決まり, LMR の炉心特性とりわけ燃焼特性を正確に把握するための 1 つの方法として断面積調整を用いているためである。金属燃料 LMR には, これまでの MOX 燃料炉心で求めたバイアス因子を適用できず, さらに金属燃料の安全性評価に重要な bowing, Na ボイド, ドップラー等の反応度係数に対してもこれまでの情報が生かされないため調整法が有利である。断面積調整では ENDF/B-V Version 2 から作成した 21 群断面積を考え, 調整の対象としては, ²³⁵U, ²³⁶U, ²³⁹~²⁴²Pu, Fe, Cr, Ni, Na, ¹⁰B, ¹¹B, C, O, Mo, Zr, Mn, Ga, ランプモデル FP の核分裂, 捕獲, 弾性, 非弾性, (n, α), 即発及び遅発中性子割合, 核分裂スペクトルの約 1000 個のパラメータを考えた。積分データとしては中性子スペクトルに関しては Jezebel 及び Godiva のような硬いスペクトルを持つ炉心から Zebra-8A, 8F のような軟らかいスペクトルの炉心まで, 核分裂性 Pu の装荷量に関しては 6 kg の Flatop-Pu から ZPPR-13C の 2491 kg の炉心まで, また均質炉心のみならず ZPPR-13C, 17A のような非均質炉心まで 28 の広範囲の炉心を考えている。これより約 300 個の積分データを断面積調整に用いている。フランスでの断面積調整と異なりクリーン炉心のみならずモックアップ炉心まで考えており制御棒反応度値, ナトリウムボイド反応度, 反応率空間分布までを

断面積調整に取り入れている。特に、炉内の中性子結合度の弱い径方向非均質炉心 Z P P R - 13C では反応率の C / E 値の空間依存性が強く約 9 % 場所により異なる。これは、反応率分布の断面積感度が大きいためであり、断面積調整に有用なデータを提供する。使用した積分データの妥当性及び調整された断面積の妥当性、適用性を調べるためのチェックを行っている。このために、ある積分データを調整から除き、他の積分データを用いて調整を行い、その調整済み断面積により核特性を予測した場合の予測値 (P) 及びその不確かさ $\sigma(P)$ を全体を考慮した場合の調整済み断面積による計算値 (A) 及びその不確かさ $\sigma(A)$ と比べている。表 5 は k_{eff} に対する結果である。Pu 燃料炉心に対する C / E の 1 からのずれは約 0.5 % であり、その断面積誤差による計算値の不確かさ $\sigma(C)$ は 1.5 ~ 3.0 %、実験誤差及び計算法の誤差による不確かさ $\sigma(E, M)$ は 0.3 % 程度である。調整により A / E は 1 に非常に近くなっており、その不確かさ $\sigma(A)$ も $\sigma(C)$ の約 1 / 10 に減少している。しかし、調整された A / E のうち、下線を引いたデータの 1 からのずれは $\sigma(A)$ と $\sigma(E, M)$ の誤差の和より大きい。P / E を見るとこの傾向がより顕著に表れており、これらのデータは他のデータと consistent でない事がわかる。但し、この場合この事が直接これらの積分データが誤っているという事には結び付かない。このように、予測性を見ることにより ANL では使用した積分データの妥当性チェックを行っている。このチェックは非常に重要である。但し、これを行うには数多くの積分データを用意する必要があることが強調された。Poenitz は Z P P R の感度係数に対する日本の S A G E P コードによる結果と ANL の結果を比較し比較的良い一致がみられることを示した。感度係数は使用した断面積にあまり依存しないので、各機関で共通に使用することができ、今後の日本と米国との共同作業により調整の研究をより進めたいと述べた。また、E N D F / B - V を調整した結果と B - VI のデータを比べ、 ^{238}U 捕獲断面積データは B - V から大幅に減少し B - VI に近づいたことを示した。

ANL - West からは、このほか調整手法に関する基礎研究、Purdue University との燃焼特性の感度係数に関する共同研究が発表された。

日本からは Z P P R 集合体の積分データを用いた J E N D L - 2 より求めた 16 群群定数の調性について述べた。特に、 ^{238}U 非弾性散乱断面積の各励起レベルの核特性への寄与は大幅に異なるので各レベルの差異を考慮した調整が必要であること、ならびに拡散係数の大型炉の反応率分布 (出力分布)、制御棒価値の C / E 値の空間依存性への寄与が非常に大きいことを述べた。また、実機大型炉の炉心特性を正確に予測するための手法として、バイアス因子法、断面積調整法及びその組合せ法を用いた場合の不確かさに対する理論を紹介した。バイアス因子法と断面積調整法についての計算手法について活発な議論となった。また、燃焼特性に対する大型炉の感度解析についても述べられた。

表1 炉物理国際会議発表論文数

セッション名		米	仏	日	英	西独	加	その他
各国における炉物理研究	8件	1	1	1	1	1	1	2
改良型軽水炉・燃料	8件	8						
改良型高速炉炉心設計	8件	3		5				
核データ (I, II)	17件	9	2	2	3	1		
スタートアップ・運転経験	8件	1	4	1		1		1
炉物理手法の応用	8件	4	1					3
高中性子束炉の炉物理	8件	6				2		
測定・解析 (高速炉, 熱炉)	17件	4	4	3	1	2		3
研究・試験炉	9件	7		1				1
炉心解析法 (I, II)	17件	6	1	1	1	2		6
改良型熱炉炉心設計 (I, II)	14件	3	1	6		1		3
安全性関係の炉物理	8件	4	1				2	1
炉理論	8件	4						4
遮蔽と炉心管理	8件	3			3		1	1
制御とモニタリング設備	8件	6			1			1
燃料管理とサイクル	8件	7						1
宇宙炉と改良型概念	8件	6		1				1
動特性	8件	5			1	1		1
	178件	87	15	21	11	11	4	29

表 2 会議のスケジュール

Snow King Resort
Jackson Hole, Wyoming, U.S.A.

September 23-24, 1988

Friday, September 23, 1988

7:30 am - 4:30 pm*	Registration
8:45 am	Welcome Administrative Details
9:00 am	"Strategy and Performances of CARNAVAL-IV: Adjustments, Uncertainties, Bias Factors," M. Salvatores, CEA, Cadarache
9:30 am	"The Adjusted Cross Section Set, FGL5; Production, Performance, and Problems," J. Rowlands, AEE, Winfrith
10:00 am	Break
10:20 am	"Adjustment of JENDL-2 Cross Section, and Production Accuracy of FBR Core Parameters Using JUPITER Integral Data," T. Takeda, M. Takamoto, A. Yoshimura, and K. Shirakata. Osaka University
10:50 am	"Uncertainty Reduction Requirements in Cores Designed for Passive Reactivity Shutdown," D. Wade, Argonne National Laboratory
11:20 am	Session Discussion
12:00 - 1:30 pm	Lunch

* Affiliations shown for lead author only

表 2 (続 き)

Friday, September 23, 1988 (Cont.)

- 1:30 pm "A Data Base for the Adjustment and Uncertainty Evaluation of Reactor Design Quantities," P. Collins, C. Atkinson, W. Poenitz, R. Lell, R. Schaefer, and J. Liaw, Argonne National Laboratory
- 2:00 pm "Utilization of Integral Experimental Data for the Adjustment and Uncertainty Evaluation of Reactor Design Quantities," W. Poenitz, P. Collins, Argonne National Laboratory
- 2:30 pm Break
- 2:50 pm "Use of Super-Phenix Startup Experiments for Data Adjustment," J. Cabrilat, et.al. CEN, Cadarache
- 3:20 pm "Prediction Uncertainty Analysis by Use of Sensitivity-Based Methodology in the Nuclear Designing of a Large Fast Breeder Reactor," T. Kamei, T. Takeda, and K. Shirakata, Nippon Atomic Industry Group Co., Ltd.
- 3:50 pm Session Discussion
- 4:30 pm Session Adjourn

Saturday, September 24, 1988

- 9:00 am "Recent Integral Experiments Designed to Improve Higher Actinide Data to Meet Design Target Accuracies: Results of Consistency Procedures," M. Salvatores, A. D'Angelo, CEA, Cadarache
- 9:30 am "Uncertainty in the Burnup Reactivity Swing of Fast Reactors," H. Khalil, T. Downar, Argonne National Laboratory
- 10:00 am Break
- 10:20 am "Nuclear Data Qualification for Thermal Neutron Reactors," H. Tellier, Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay
- 10:50 am "Topics in Data Adjustment Theory and Applications," R. Hwang, Argonne National Laboratory
- 11:20 am Session Discussion

表 2 (続 き)

Saturday, September 24, 1988 (Cont.)

12:00 - 1:00 pm	Lunch (<u>NOTE</u> : 1 hour)
1:00 pm (<u>NOTE</u> : Early Start)	"Adjustment Methods for System Design and Operation Improvement," A. Gandini, ENEA/VEL, CRE Casaccia (Rome)
1:30 pm	"Prospects for Improved Covariance Data in the ENDF/B-VI Differential Data Evaluation," P. Peelle, D. Muir, Oak Ridge National Laboratory
2:00 pm	"Target Accuracy Considerations for US Advanced LMR Core Designs," Y. Orechwa, Argonne National Laboratory
2:30 pm	Session Discussion
3:00 pm	Break
3:20 pm	Meeting Wrap-up - Rapporteur Reports - Discussion
4:30 pm	Meeting Adjourn

表3 LMFBRの燃焼反応度損失の不確かさ
に対する重核の寄与

	A	B	C	D
BALZAC	NO	YES	YES	YES
PROFIL	NO	NO	YES	YES
TRAPU	NO	NO	NO	YES
HEAVY ISOTOPES UNCERTAINTY CONTRIBUTION	~ 26 %	~ 23 %	~ 17 %	~ 9 %

表4 異なる積分データを用いた場合の断面積調整による断面積の変化とその不確かさ

		A	B	C	D
BALZAC		NO	YES	YES	YES
PROFIL		NO	NO	YES	YES
TRAPU		NO	NO	NO	YES
NUMBER OF EXPER. RESULTS		ZERO	5	9	18
RESIDUAL χ^2		ZERO	2	3	15
DATA ADJUSTMENT AND UNCERTAINTIES (%)					
U-238	ν	0.0 ± 1	-0.3 ± 0.8	-0.4 ± 0.7	-0.4 ± 0.6
	σ_f	0.0 ± 10	$+2.6 \pm 7.5$	$+3.6 \pm 7.2$	$+3.8 \pm 6.3$
	σ_c	0.0 ± 2	-0.2 ± 1.9	$+0.8 \pm 1.4$	$+1.7 \pm 1.1$
	σ_s	0.0 ± 10	-1.5 ± 9.3	-2.1 ± 9.2	-3.4 ± 9.0
	σ_{tr}	0.0 ± 5	$+0.3 \pm 4.9$	$+0.5 \pm 4.8$	$+0.8 \pm 4.8$
Pu-239	ν	0.0 ± 1	0.0 ± 0.8	0.0 ± 0.7	-0.2 ± 0.5
	σ_f	0.0 ± 2.5	0.0 ± 2.0	0.0 ± 1.8	$+0.6 \pm 1.2$
	σ_c	0.0 ± 10	-0.2 ± 8.3	-1.4 ± 2.1	-0.5 ± 1.9
Pu-240	ν	0.0 ± 1	0.0 ± 0.3	$+0.1 \pm 0.3$	$+0.1 \pm 0.2$
	σ_f	0.0 ± 25	-1.0 ± 8.1	-1.7 ± 6.5	-3.4 ± 4.7
	σ_c	0.0 ± 12	0.0 ± 11.8	-1.5 ± 2.0	-3.0 ± 1.1
Pu-241	ν	0.0 ± 1	$+0.4 \pm 0.8$	$+0.4 \pm 0.8$	$+0.2 \pm 0.2$
	σ_f	0.0 ± 7	-3.0 ± 5.9	-3.1 ± 5.8	-1.5 ± 1.0
	σ_c	0.0 ± 12	$+0.7 \pm 12$	-2.2 ± 3.7	$+0.2 \pm 2.8$

表5 断面積調整前後での k_{eff} と k の計算値の
実験値からのずれとそれらの標準偏差

Assembly	C/E-1, %	$\sigma(C)$, %	$\sigma(E, M)$ %	A/E-1, %	$\sigma(A)$, %	P/E-1, %	$\sigma(P)$, %
<u>Pu-fueled</u>							
Jezebel	-0.2	1.8	0.2	-0.1	0.18	0.0	1.1
Jezebel-Pu	-0.8	1.6	0.3	-0.7	0.20	-1.1	0.9
Flattop-Pu	0.7	1.6	0.2	0.4	0.14	1.3	0.8
ZPPR-12V	0.1	1.4	0.3	-0.1	0.14	0.3	0.6
ZPPR-12	-0.1	1.4	0.3	-0.2	0.12	0.1	0.6
ZPPR-15A	-0.5	1.6	0.3	0.2	0.14	0.4	0.6
ZPPR-15B	-0.5	1.7	0.3	0.1	0.14	0.3	0.6
Zebra-8 B	1.0	3.2	0.4	0.7	0.25	1.5	0.6
ZPR-3/56B	-1.0	1.5	0.3	-0.5	0.16	-0.2	0.6
Zebra-8 E	-1.6	2.7	0.4	-0.7	0.21	-0.4	0.6
ZPPR-13C	-0.7	1.6	0.3	0.0	0.12	0.3	0.6
Zebra-8 D	0.1	2.6	0.5	0.7	0.20	1.4	0.6
ZPPR-17A	-0.7	1.6	0.3	0.0	0.12	0.4	0.6
Zebra-8 C	-2.2	1.9	0.5	-0.4	0.27	0.1	0.8
ZPR-6/7	-0.8	1.6	0.3	-0.1	0.13	0.4	0.6
Zebra-8 A	-1.4	2.0	0.7	-0.8	0.33	0.5	0.7
Zebra-8 F	-0.3	1.9	0.5	0.5	0.33	1.8	0.7
Average	-0.5			-0.06		0.42	
<u>U-fueled</u>							
Godiva	-0.3	1.6	0.1	0.0	0.13	0.0	0.8
Flattop-25	0.4	1.2	0.1	-0.1	0.12	0.4	0.7
Big-10	1.6	2.0	0.3	0.1	0.17	0.9	0.7
ZPR-9/36	1.4	2.2	0.3	0.3	0.14	0.9	0.6
Scherzo	0.9	3.4	0.4	0.1	0.26	0.1	0.7
Zebra-8 H	0.3	3.1	0.4	-0.4	0.20	0.0	0.6
ZPPR-15D	-0.7	1.1	0.3	-0.1	0.18	-0.1	0.6
ZPR-6/6A	-1.2	1.2	0.3	-0.1	0.19	0.0	0.6
Average	0.3			-0.03		0.28	

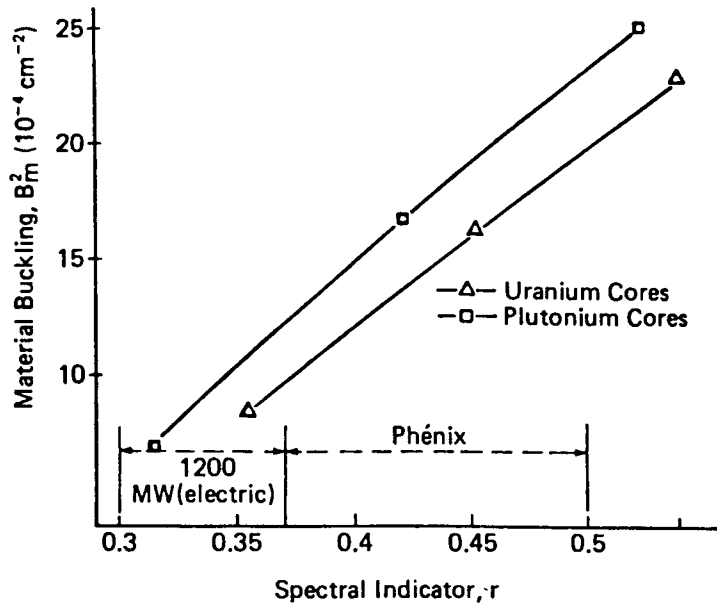


図1 スペクトル指標 $r = \frac{\nu \Sigma f}{\xi \Sigma s}$ と材料バックリングの関係

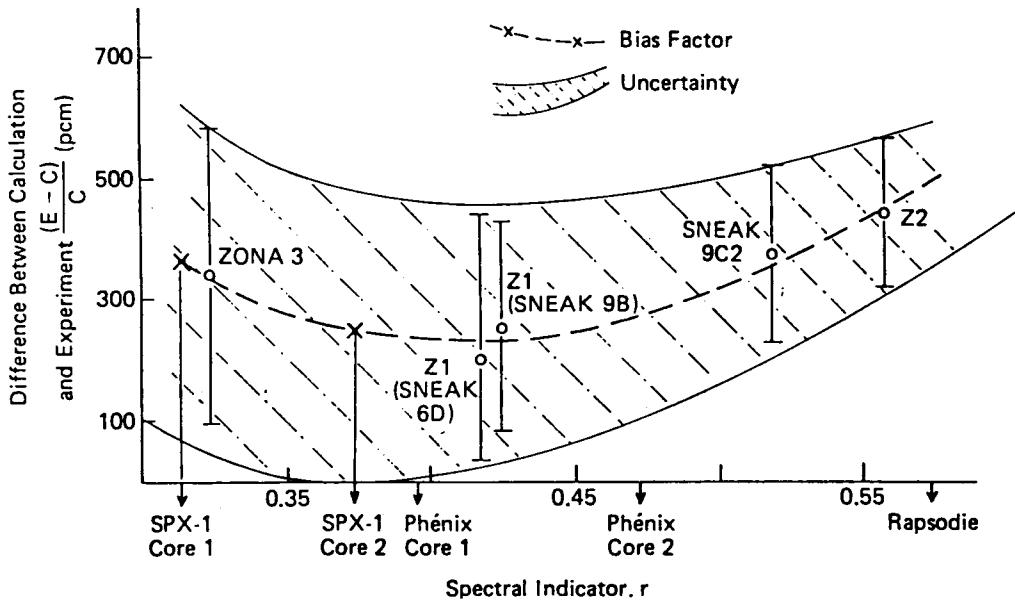


図2 断面積調整後の各炉心の k_{eff} の (C - E) 値