

JAERI-M

8 8 4 6

単一本の被覆粒子燃料棒の温度上昇に
伴う反応度変化の測定

1980年5月

金子 義彦・安田 秀志・秋濃 藤義・竹内 素允

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

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

単一本の被覆粒子燃料棒の温度上昇に伴う反応度変化の測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

金子 義彦・安田 秀志・秋濃 藤義・竹内 素充

(1980 年 4 月 9 日 受理)

高温ガス実験炉の炉心設計に関する精度実証に寄与することを目的として、単一燃料棒昇温装置を使用して、SHE-14 炉心において、単一本の被覆粒子燃料棒の温度上昇に伴う反応度の減少量を測定した。この被覆粒子燃料棒は、4%の濃縮ウランを使用した高温ガス実験炉用の被覆粒子ウランペレットを石英管に装填したものであって、炉心中心軸に貫通して挿入した。単一燃料棒の温度上昇に伴う反応度の減少量から、同一形状の黒鉛棒の温度上昇に伴う反応度の減少量をさし引いた量は、ドップラー効果により増加した ^{238}U の共鳴吸収にのみ原因すると解釈することが出来る。この測定結果は、ENDF/B-3の共鳴パラメータを使用して評価した ^{238}U の実効共鳴積分の増加量のみを考慮した摂動理論による計算結果と極めて良く一致した。したがって、被覆粒子燃料を使用した高温ガス実験炉のドップラー反応度係数は、上記の核データ・手法により可成り良い精度で評価し得るといふ実験的根拠を得た。

Measurement of Reactivity Change with Temperature
of Single Fuel Rod Using Coated Particles

Yoshihiko KANEKO, Hideshi YASUDA,

Fujiyoshi AKINO and Motoyoshi TAKEUCHI

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 9, 1980)

Reactivity decrease with temperature rise of a single coated-particle fuel rod was measured in a SHE-14 core using a heating apparatus, to verify the core design accuracy of High Temperature Experimental Reactor. The coated-particle fuel rod was made by inserting 4 % enriched uranium coated-particle fuel pellets into a silica sleeve. The rod was then inserted into a heating tube of the heating apparatus, which was placed along the central axis of the SHE-14 core.

The measured reactivity decrease for the single coated-particle fuel rod, minus the reactivity decrease graphite rod of same form, can be interpreted to originate only in the increased resonance neutron capture rate of ^{238}U by Doppler effect. The measured reactivity decrease is in excellent agreement with the calculated value by multi-group perturbation theory taking into account only the increased effective resonance integral of ^{238}U estimated using the resonance parameter of ENDF/B-3.

It is concluded, therefore, that calculation of Doppler reactivity coefficient using the resonance parameters is very accurate for Very High Temperature Experimental Reactor using coated-particle fuel.

Keywords: Critical Experiment, Single Fuel Rod, Doppler Effect, Temperature, Reactivity, High Temperature Reactor, Multi-Group Perturbation Calculation, Uranium 238 Resonance Integral

目 次

1. 序 論	1
2. 実 験	1
2.1. 実験装置の配置	1
2.2. 実験体系と被覆粒子ウランペレット	1
2.3. 昇温装置	2
3. 実験結果	3
3.1. 燃料棒の昇温に原因する反応度の減少量の決定	3
3.2. 燃料棒温度と反応度の関係	4
3.3. 測定誤差	4
4. 実験解析	7
5. 結 論	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
2.1 Arrangements of experimental apparatus	1
2.2 Experimental system and coated particle fuel pellets	1
2.3 Heating apparatus	2
3. Experimental results	3
3.1 Determination of reactivity decrease followed by temperature rise of fuel rod	3
3.2 Relation between fuel rod temperature and reactivity	4
3.3 Experimental error	4
4. Experimental analysis	7
5. Conclusion	8

1. 序 論

高温ガス実験炉に関する研究開発が、原研においてすすめられているが、なかでも、炉心核特性の把握が重要な課題の一つになっている。核特性のなかで、重点を置くべきものの一つとして、反応度の温度係数がある。その第一の理由としては、いうまでもないことであるが、ドップラー効果による ^{238}U の共鳴吸収の増加は即発的に負の反応度を発生させて、反応度事故時に、原子炉の出力バーストを停止する作用を持つから、精度の高い評価を必要とされるからである。第二の理由としては、反応度の温度係数の反応度バランスへの影響が大きいことがあげられる。つまり、高温ガス実験炉の炉心温度は平均して、約 900°C であるので、出力温度までの温度上昇による反応度の低下量はかなり大きく、 $5\sim 9\% \Delta k/k$ にも達するからである。この反応度の温度係数の問題の中でも、ドップラー効果に関する負の反応度効果についての核設計精度の実証のために、高温ガス実験炉の模擬炉心であるSHE-14炉心において、単一燃料棒昇温装置を使用して、今回、被覆粒子ウランペレットにより構成される燃料棒を昇温した場合の反応度の減少量を臨界制御棒位置の変化から測定したので報告する。この燃料棒についての反応度の減少量から、同一の寸法の黒鉛棒を昇温した場合の反応度の減少量をさし引いた量はドップラー効果による ^{238}U の共鳴吸収の増加にのみ原因していると解釈することができる。

2. 実 験

2.1 実験装置の配置

被覆粒子ウランペレットを使った一本の試験燃料棒を収納した昇温装置の昇温管を、SHE-14炉心の炉心中央の黒鉛マトリックス管を引抜きその後へ挿入した。電気加熱により試験燃料棒を常温より 700°C まで昇温し、 ^{238}U のドップラー効果により減少する反応度を臨界に保持するための制御棒の位置の変差から決定した。実験装置の配置図をFig. 1に示す。SHE-14炉心の構成は文献1に、また、昇温装置の構造については文献2にそれぞれ詳述した。

2.2 実験体系と被覆粒子ウランペレット

Fig. 2に、SHE-14炉心の断面を示したが、6本の燃料棒を同心円環状に配置したカラム7単位より全炉心が構成されている。燃料棒は20%濃縮の UO_2 の微粉と黒鉛粉を混合し、冷間圧縮成型して製作した燃料ペレット115枚を黒鉛さやに挿入したものである。SHE-14炉心の ^{235}U の全装荷量は4.96kgであり、炉心平均の $C / ^{235}\text{U}$ 原子比は7158である。SHE-14炉心の諸元をTable 1にまとめた。

被覆粒子ウランペレットは、直径 $600\ \mu$ の4%の濃縮酸化ウラン粒子を核分裂生成物の放出を

抑制するための低密度炭素、パイロリテイクカーボン、炭化硅素及びパイロリテイクカーボンの順で四層に被覆した被覆粒子を黒鉛マトリックス中に分散し外径 24 mm、内径 8 mm、高さ 36 mm の中空円筒状に成型したものである。Fig. 3 に、ペレットの構造を図示すると共に、Table 2 に主たる仕様をまとめた。一方、黒鉛棒を構成するために使った黒鉛ペレットは、被覆粒子ウランペレットと寸法がほとんど同じ外径 24 mm、内径 6.5 mm、高さ 36 mm のもので、密度は、被覆粒子ウランペレットの黒鉛マトリックス密度と同じ 1.7 g/cc である。

2.3 昇温装置

単一燃料棒をニクロム線ヒータを巻いた石英管中に収め電気加熱して約 700 °C まで昇温する装置であって、昇温管部のほか、真空排気系、冷却系、計測制御系及び安全保護系より構成される。昇温管部は SHE 炉心部の黒鉛マトリックス管 1 本を引抜きそのあとへ挿入する。昇温管部の基部は、真空排気系と直結され SHE 1/2 集合体移動側架台上に固定される。冷却系は SHE 炉室床に固定されるが、配管により昇温管基部と連結する。制御盤は、SHE 制御室に置き遠隔操作により装置本体を運転制御できるようになっている。装置本体の系統図を Fig. 4 に示した。

昇温管部はその断面を Fig. 5 に示したが、多重管構造をしている。燃料棒ないし黒鉛棒を収納した石英管はジルカロイ管中に保持し真空断熱して伝導伝熱を防止する。放射伝熱による漏洩熱は、ジルカロイ管の外側を空気冷却して除熱する。さらに、断熱効果を高めるため内部を真空にした二重アルミニウム管で、ジルカロイ管をおおって炉心への熱漏洩を避ける。SHE 集合体が密着したとき、昇温管の先端部は固定側 1/2 集合体の背部に押出されるが固定 1/2 集合体の背部にとりつけた水平案内樋を滑らせるようになっている。

昇温実験の解析・評価にあたっては、昇温管部の単位長さあたりの物質構成を知っておくことが必要である。そこで、構成する物質の名称、寸法、密度、成分、原子数密度を Table 3 にまとめた。また、実験結果の解釈を見通しよくするためには、理想的なことをいうと、サンプルである黒鉛ないし被覆粒子ウランペレットのみが昇温されることが望ましいし、ジルカロイ管やアルミニウム管は 雑物である。そこで、もともと、設計にあたっては、中性子吸収の少ない材料を選定し、できるだけ、厚みを薄くするという方針をとった。Table 4 において、昇温管の各部の熱及び共鳴中性子反応率の尺度としてマクロ吸収断面積ないし、共鳴吸収積分を示した。被覆粒子ウランペレットの場合には、熱中性子吸収のおよそ 60% が、また共鳴吸収積分については、昇温される部分つまり、石英管及びニクロム線をふくむ構造材まで考慮したとき約 90% がウラン中において起こることになる。したがって、かなり純粋に ^{238}U の共鳴吸収のドップラー効果を探究しうる装置であるといえよう。

3. 実験結果

3.1 燃料棒の昇温に原因する反応度の減少量の決定

Fig. 6に、燃料棒温度と制御棒の位置及び相当する反応度の減少量の実測結果を昇温温度 680 °Cの場合について示した。この図には次のことが示されている。

○昇温期

○電気加熱を開始すると、約1時間で、燃料棒の温度は約10 °Cより680 °Cまで上昇する。この間、反応度の減少はかなり急速であって、約6φに達す。

○温度一定期

○昇温装置の運転を、燃料温度が680 °Cになるように自動制御に切換え約2時間運転する。燃料棒の温度は約680 °Cに保持されるが1~2 °Cの変動はある。昇温期とこの温度一定期の間には過渡期があるのでこの過渡期が終ってから、測定した反応度に次にのべる炉心温度の変化に主として原因する成分について補正を加えて純粋に燃料棒の昇温に原因する反応度の減少量の決定を行うことが出来る。

燃料棒の温度が一定なのにもかかわらず、反応度はゆっくり減少をつづけて、約1φ減少する。この現象は、昇温管から約20 Wの熱漏洩を主として、また、炉室空気温度の変化を従として起る。炉心の温度上昇による反応度の減少であることが確認されている。

○降温期

加熱電源を切ると、燃料棒の温度は約1時間で400 °Cまで降下する。この間、反応度は約2.8φ増加していく。この降温期におけるデータは、燃料棒の温度分布が一様性を欠いているという判断のもとに反応度の決定に利用しなかった。

図に示した、諸量の関係を単純化して理解したのがFig. 7である。

この図においては、 ρ 、 T 及び t は、それぞれ、制御棒位置から読み取った余剰反応度と燃料棒の温度及び時刻である。添字の s 、 r 及び i は、それぞれ、昇温する前の定常運転時、昇温開始時及び温度一定期の開始点を示している。さらに添字の m と f は、温度一定期中途において、温度と反応度を測定した時点及び温度一定期の終点を示している。

さて、以上の諸量を定義しておく、純粋に燃料棒の温度上昇に原因する反応度の減少量 ρ_{true} は次式により与えられると考えられる。

$$\rho_{\text{true}} = \rho_m - \rho_s - \frac{(\rho_f - \rho_i) + \frac{d\rho}{dT}(T_f - T_i)}{(t_f - t_i)} \cdot (t_m - t_r) \dots\dots\dots (1)$$

この式の意味するところは、 $\rho_m - \rho_s$ がおよその反応度減少量であるが、これに、温度一定期中における ρ_m の測定までの昇温管からの熱漏洩に原因する。

炉心の温度上昇による反応度の減少を補正したものである。 $\frac{d\rho}{dT}$ としては、680 °Cにおける実験値の暫定値として、0.0089 φ/°Cが用いられた。補正量のめやすとして、第3項の分子の

$$\rho_c = \rho_f - \rho_i + \frac{d\rho}{dT} (T_f - T_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

をデータ整理に記録することにした。

所定温度が 300 °C の場合の実験データのグラフを Fig. 8 に示したが、燃料棒の温度が低いので、熱漏洩量は少なく、温度一定期における反応度の減少は少ない。

3.2 燃料棒温度と反応度の関係

実験は上記の所定温度 300 °C、680 °C のほか、200 °C、400 °C、500 °C 及び 600 °C について行った。以上のべた方法による燃料棒温度と反応度の減少のデータ整理の結果を Table 5 に一括すると共に、Fig. 9 に示した。

また、燃料棒の代りに黒鉛棒を使用して、昇温した場合の反応度の減少に関する実験データを Fig. 10 に一括した。

3.3 測定誤差

(1) 反応度変化の測定誤差

(i) 制御棒の追従の不正確さによる誤差

SHE の出力変動が 1 W、±1 % 以内になるように、制御棒を動かし、 $10 \sim 20 \times 10^2$ sec にわたる平均の制御棒位置から反応度を決定した。

$10 \sim 20 \times 10^2$ sec で 1 % の中性子束の変動をもたらす反応度 ρ は

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{0.0068 \times 10 \times 10^{-2}}{10 \times 10^2 \times 2.3} \\ &= \frac{0.68}{2.3} \times 10^{-6} \\ &= 0.29 \times 10^{-6} \\ &= \frac{0.29 \times 10^{-6} \times 10^{-2}}{0.0068} \phi \\ &= \frac{0.29 \times 10^{-2}}{0.68} \phi = 0.005 \phi \end{aligned}$$

無視しうるほど小さい。

(ii) 炉心の大気温度の変動による温度変化に原因する反応度変化

SHE を長時間運転するときの反応度変化を実測してみると 140×10^2 sec の間に、制御棒位置にして 1.5 mm、反応度にして $\frac{4.7}{40} \times 1.5 = 0.18 \phi$ ある。

ヒーター ON から昇温終了反応度測定までの時間は 80×10^2 程度であるので、 $0.18 \times \frac{80}{140} = 0.1 \phi$ 程度の反応度変化が起きていることになる。しかし、(iv) の熱漏洩補正によりほとんど補正されていると考えられる。

従ってこの項目の誤差は無視する。

(iii) 制御棒校正曲線の誤差

5 ϕ , 炉周期 100 秒程度の倍時間測定より校正している。± 2 %程度つまり 0.1 ϕ 程度の誤差が 5 ϕ について発生する。

(iv) 熱漏洩効果の補正の不完全

補正により 80% 程度は見積られているだろうが、20% 程度は、あいまいになると見積って、

$$500\text{ }^{\circ}\text{C}\text{の場合} \quad (4.50 - 4.27) \times 0.2 = 0.05 \phi$$

$$600\text{ }^{\circ}\text{C}\text{の場合} \quad (5.51 - 5.10) \times 0.2 = 0.08 \phi$$

$$700\text{ }^{\circ}\text{C}\text{の場合} \quad (6.19 - 5.71) \times 0.2 = 0.096 \phi$$

以上の議論により、

燃料棒に関する測定誤差の合計

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	誤 差 (ϕ)				二乗和の平方根
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	
200	0	0	0.05	0	0.05
300	0	0	0.05	0	0.05
400	0	0	0.07	0.05	0.09
500	0	0	0.11	0.08	0.14
600	0	0	0.13	0.10	0.16
700	0	0	0.15	0.12	0.19

黒鉛棒に関する誤差の合計

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	誤 差 (ϕ)				二乗和の平方根
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	
260	0	0	0.01	0.02	0.02
410	0	0	0.02	0.02	0.03
680	0	0	0.04	0.05	0.07

従って、純粹に、粒子状の UO_2 の昇温による反応度の減少量の誤差は、両者の差をとるので上記の誤差の二乗和の平方根として与えられる。

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	誤 差 (ϕ)
200	$\sqrt{0.05^2 + 0.02^2} = 0.05$
300	$\sqrt{0.05^2 + 0.02^2} = 0.05$
400	$\sqrt{0.09^2 + 0.03^2} = 0.09$
500	$\sqrt{0.14^2 + 0.04^2} = 0.15$
600	$\sqrt{0.16^2 + 0.05^2} = 0.17$
700	$\sqrt{0.19^2 + 0.06^2} = 0.20$

(2) 温度の測定誤差

被覆粒子ウラン燃料棒の入口、中心及び出口の3ヶ所にCA熱電対を設置して、温度計測を行った。3ヶ所の温度が、そろっていることを確認した後、中心温度を燃料棒の代表温度としてデータ整理に用いた。各所の温度は、昇温装置制御盤のレコダーに記録すると共に、データー出力装置にデジタル記録した。

誤差原因

(i) CA熱電対の温度-電圧変換誤差

JIS1級を使用しているので、0.75~1.5%

(ii) データ出力装置のA-D変換誤差

約1%

(iii) 補償導線による誤差

約3°C、これは、昇温前後の温度差には影響しない。

誤差の総和としては、(1)、(2)の自乗和、平方根をとって、1.8%となる。以上の考察により200°Cから700°Cの温度測定における誤差を以下のように評価した。

温 度 (°C)	誤 差 (°C)
700	13
600	11
500	9
400	7
300	5
200	4

4. 実験解析

計算では、昇温管を挿入した空孔は、中心に被覆粒子燃料棒を内蔵した黒鉛棒が挿入されているものと仮定し、被覆粒子燃料棒中の粒子状のUO₂のみが296Kより1000Kまで加熱された場合のDoppler効果に原因した²³⁸Uの共鳴吸収の増加による反応度の減少量を求めた。まず、計算のための簡単化された体系の様子をFig. 10に示す。

摂動論により反応度の減少量は、熱外領域における共鳴吸収の増加によるもののみを考慮することとし核分裂の共鳴積分の変化を無視すれば

$$\rho = \frac{\int \int_{V_f} \int_{E_c}^{\infty} \delta \Sigma_a \phi(E, r) \phi^*(E, r) dE dr}{\int \int_{V_f} \int_0^{\infty} \chi(E) \phi^*(E, r) dE dr \int_0^{\infty} \nu \Sigma_f(E', r) \phi(E', r) dE'} \quad \dots\dots\dots (3)$$

により与えられる。

2群拡散理論により(3)式を表現すると、次のようになる。添字の1及び2はそれぞれ、速中性子及び熱中性子群を示すものとし、 ϕ および ϕ^* を中性子束とインポートランスとして、

$$\rho = \frac{-\int_{V_f} \delta \Sigma_{a1} \phi_1 \phi_1^* dr}{\nu \int_{V_c} \Sigma_{1f} \phi_1 \phi_1^* dr + \nu \int_{V_c} \Sigma_{2f} \phi_2 \phi_1^* dr} \quad \dots\dots\dots (4)$$

SHE-14 炉心の ϕ 、 ϕ^* の計算は2群拡散コードFOGで行った。臨界半径は、40 cmであり、 $r = 0$ における ϕ と ϕ^* の値は

$$\begin{aligned} \phi_1(0) &= 0.43711 \times 10^{-1} \\ \phi_2(0) &= 0.2267 \times 10^{-1} \\ \phi_1^*(0) &= 0.7011 \times 10^{-4} \\ \phi_2^*(0) &= 0.10407 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

である。

次に²³⁸Uの共鳴吸収積分をRICMコードにより、ENDF/B-3の共鳴パラメータを用いて計算し、次の結果を得た。

	296 K	1000 K
RI(²³⁸ U)バーン	48.48	58.89

但し、粒子の効果は無視されている。

以上の計算によって、

$$\begin{aligned} \rho &= 0.0002743 \Delta k / k \\ &= (0.04010 \text{ \$}) \quad \beta_{\text{eff}} = 0.0068 \end{aligned}$$

一方、34群の臨界計算による臨界半径 $r = 38.2$ cmにまで(4)式の分母の空間積分を限定した

場合は

$$\begin{aligned}\rho &= 0.0002961 \Delta k/k \\ &= (0.0433 \text{ \$})\end{aligned}$$

となった。

実験と比較するために、後者の値を 10°C から 680°C に昇温した場合に換算すると

$$\begin{aligned}\rho_{\text{eff}} &= 0.0433 \times \frac{(680-10)}{(1000-296)} \\ &= 0.0412 \text{ \$} \\ &= 4.12 \text{ \phi}\end{aligned}$$

となり、測定値の $4.01 \pm 0.20 \text{ \phi}$ とかなり良く一致する。UO₂ が粒子状である効果を考慮した計算を行うと若干小さめになる見通しであり、さらに良く実験を説明し得ると考えられる。

5. 結 論

高温ガス実験炉の炉心設計に関する精度評価に寄与することを目的として、単一燃料棒昇温装置を使用して、SHE-14 炉心において、単一体の被覆粒子燃料棒の温度上昇に伴う反応度の減少量を測定した。この被覆粒子燃料棒は、4%の濃縮ウランを使用した高温ガス実験炉用の被覆粒子ウランペレットを石英管に装填したものであり、炉心中心軸を貫通させた。単一燃料棒の温度上昇に伴う反応度の減少量から、同一形状の黒鉛棒の温度上昇に伴う反応度の減少量をさし引くことにより、ドップラー効果による ²³⁸U の共鳴吸収の増加のみに起因する反応度の減少量を求めることが出来た。この測定結果は、ENDF/B-3 の共鳴パラメータを使用した RICM コードによる実効共鳴積分の増加のみを考慮した摂動理論による計算結果と極めて良く一致した。したがって、高温ガス実験炉のドップラー反応度係数は、上記の核データ、手法により、可成り良い精度で評価し得るといふ実験的根拠を得た。

この実験は、被覆粒子ウランペレットの製造に努力された原子燃料工業 K K の方々の協力によって可能になった。一方、単一燃料棒昇温装置の製作は、日本カーボン株式会社に担当していただいた。また、SHE における実験にあたっては、炉物理実験技術開発室の北館憲二及び吉藤久氏に、SHE 及び単一燃料棒昇温装置の運転を担当していただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

1. 金子義彦, 秋濃藤義, 北館憲二, 黒川良右: “濃縮ウラン黒鉛減速炉心の臨界実験” JAERI-1257 (1977)
2. 金子義彦, 竹内素充, 榊山年夫: “単一燃料棒昇温装置の製作と試験” JAERI-M 8311 (1979)

Table 1 Characteristics of SHE-14 core

Core configuration	SHE-14
C/ ²³⁵ U	7158
²³⁵ U critical mass (kg)	
Exp.	4.96
Cal.	4.57 (4.62*)
Core radius (cm)	
Exp.	39.58
Cal.	37.96 (38.18*)
Core length (cm)	240
Core + Reflector radius (cm)	129.2
Calculated values of effective multiplication factor	
	1.0209 (Homogeneous model)
	1.0184 (Heterogeneous model (I))
	1.0077 (Heterogeneous model (II))
	1.0321* (Heterogeneous model with ENDF/B-4)

Table 2 Structural material of heating tube

名 称	外 径 (mm)	内 径 (mm)	厚さ(mm) / 体積 (cm ³)	密 度* (g/cm ³)	重 量 (g/cm)	成 分		備 考
						核 種	W %	
SUS 細管 (SUS 304)	6	5	0.5/ 0.0864	7.78	0.672	Fe Cr Ni	722 183 9.5	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
黒鉛棒	24	6.5	8.75/ 4.192	1.71	7.168	C	100	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
石英管 (石英ガラス, SiO ₂)	28.5	24.5	2/ 1.67	2.2	3.674	Si O	467 533	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
ニクロム線 (被覆率 65/30)	28.9	28.5	0.4/ 0.0776	8.357	0.638	Ni Cr	782 202	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
ジルカロイ管 (ジルカロイ-II)	45.8	41.8	2/ 2.75	6.45	17.77	Zr Sn	98.4 1.6	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
内側アルミニウム管	55	51	2/ 3.33	2.70	8.99	Al	100	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
外側アルミニウム管	63	59	2/ 3.84	2.70	10.4	Al	100	核 種 原子量 密度 (g/cm ³)
被覆粒子クラウン ベレット (UO ₂ 核直径 600 μ)	24	8	8/ 4.021		U: 3.246			核 種 原子量 密度 (g/cm ³)

** Nuclear Engineering Handbook による。

* 密度 = $\sum_i (i \text{物質の百分重量率}) \times (i \text{物質の密度})$

Table 3 Neutron absorption reaction of structural material of heating tube

名 称	核 種	原子数 N/cm ($\times 10^{24}$)	熱中性子吸収* ($N\sigma/cm$)	共鳴中性子吸収** (NIa/cm)
SUS 細管	Fe	0.0523	0.132	0.121
	Cr	0.0142	0.041	0.037
	Ni	0.0074	0.034	0.024
黒鉛サンプル	C	3.595	0.0107	—
石英管	Si	0.368	0.0478	0.184
	O	0.737	0.0001	—
ニクロム線	Ni	0.0512	0.236	0.164
	Cr	0.0132	0.038	0.034
ジルカロイ管	Zr	1.154	0.208	1.085
内側 アルミニウム管	Al	2.008	0.462	0.321
外側 アルミニウム管	Al	2.323	0.534	0.372
被覆粒子 ウランペレット	^{235}U	0.003328	2.309	0.9119
	^{238}U	0.07886	0.215 全体の59.1%	2.216 (実効3.81**) 全体の90.4% (実効87.1%, ニクロム 線までの昇温部のみ考慮)
夾雑物の合計 (ニクロム線 までの合計)			1.744	2.342 (0.564)

* σ ミクロ吸収断面積

NIa ミクロ中性子吸収共鳴積分

** ^{238}U の実効共鳴積分48.48バーンを使用, ニクロム線等は共鳴積分をそのまま使用

Table 4 Experimental results for reactivity decrease due to temperature rise of coated particle uranium fuel rod

Nominal temperature (°C)	Excess reactivity (ρ)				Temperature of fuel rod center (°C)				Reactivity decrease (ρ)			Date
	ρ_s	ρ_m	ρ_i	ρ_f	T_s	T_m	T_i	T_f	$\rho_m - \rho_s$	ρ_c	ρ_{true}	
200	20.13	17.88	18.00	17.76	9.2	227.6 [228.4]*	234.5	229.6	2.26	0.26	1.83 [1.26]**	54-2-22
300	22.73	20.21	20.19	20.18	9.5	305.8 [307.3]*	306.8	305.8	2.52	0.019	2.51 [1.725]**	54-2-15
400	19.74	16.39	16.38	16.35	10.7	398.3 [397.6]*	397.9	398.2	3.34	0.028	3.31 [2.28]**	54-2-23
500	22.33	17.83	17.92	17.73	8	498.4 [500.4]*	497.8	495.7	4.50	0.208	4.27 [2.98]**	54-2-20
600	22.92	17.41	17.56	17.27	14.9	595.2 [590.3]*	597.8	597.2	5.51	0.30	5.10 [3.56]**	54-2-9
700	22.67	16.21	16.51	16.00	17.1	680.7 [673.6]*	678.4	679.4	6.46	0.50	5.85 [4.10]**	54-2-13
	22.08	16.15	16.15	15.85	8.3	650.7 [652.4]*	650.7	640.4	6.19	0.44	5.71 [4.01]**	54-3-6

* Temperature in bracket is effective value when T_s is taken as 10°C

** Reactivity decreases only due to temperature rise of UO_2 fuel particles, which are obtained by subtracting ρ_{true} by the corresponding reactivity decreases due to the graphite rod.

Table 5 Experimental results for reactivity decrease due to temperature rise of graphite rod

Temperature of fuel rod center* (°C)	Reactivity decrease** (¢)
260	0.64
410	1.08
680	1.78

* Initial temperature of fuel rod is about 10°C.

** Averaged reactivity decrease rate is 2.64×10^{-3} ¢/°C or 1.795×10^{-7} $\Delta k/k/^\circ\text{C}$.

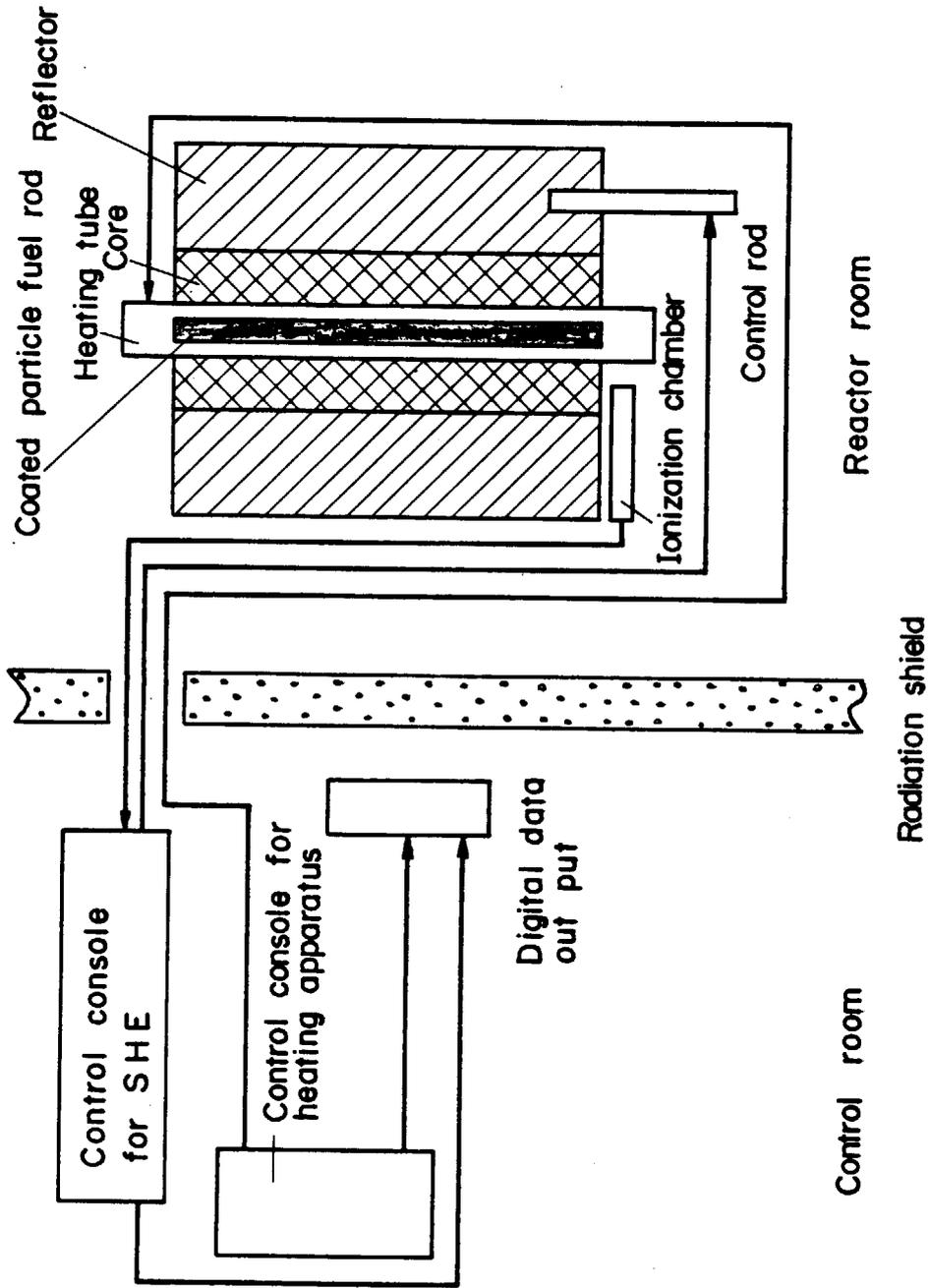
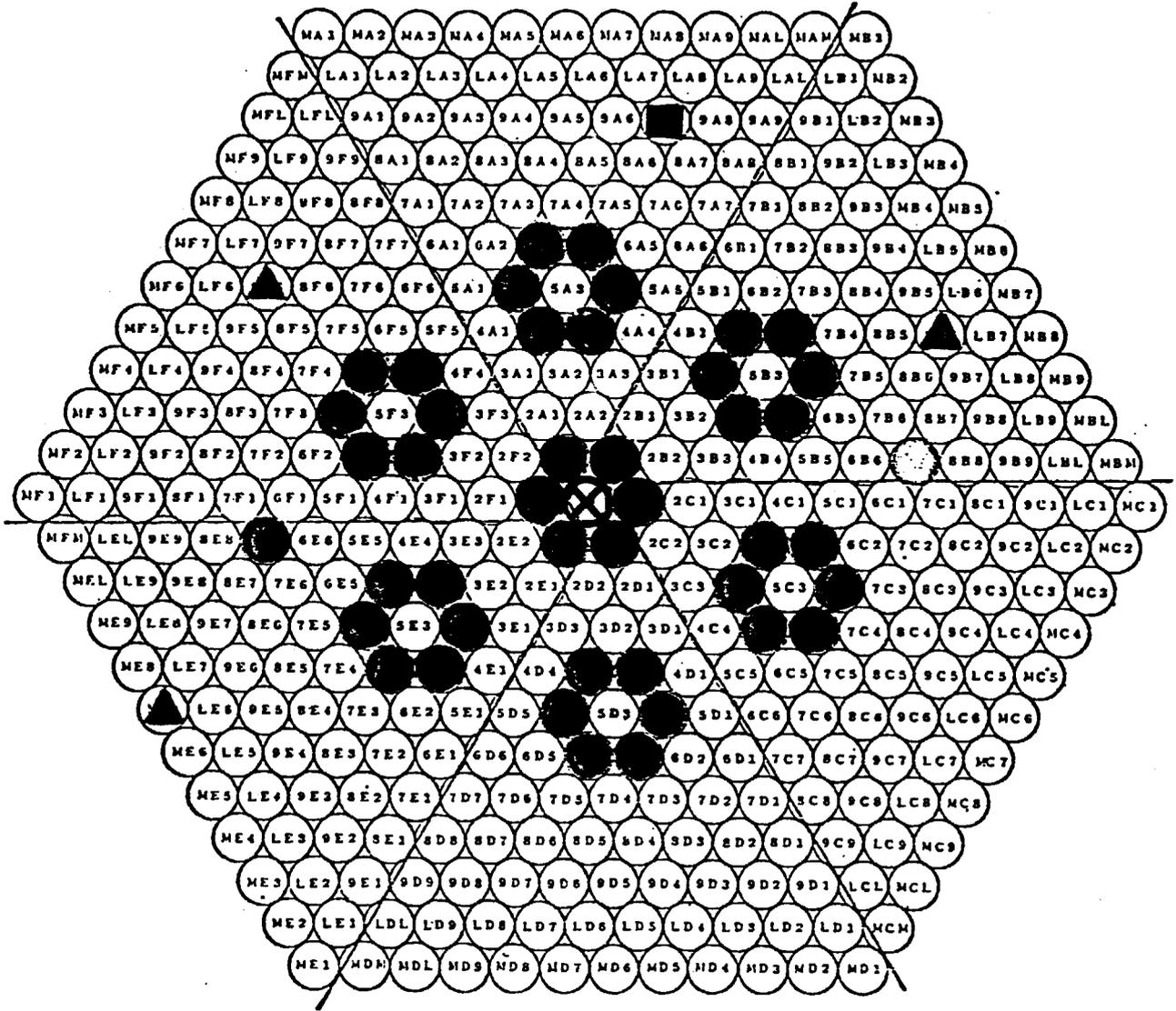


Fig. 1 Block diagram for measurement of reactivity decrease of coated particle fuel rod with temperature rise



S H E - 14

- FUEL ROD
- ⊗ HEATING TUBE

Fig. 2 Cross section of SHE-14 core

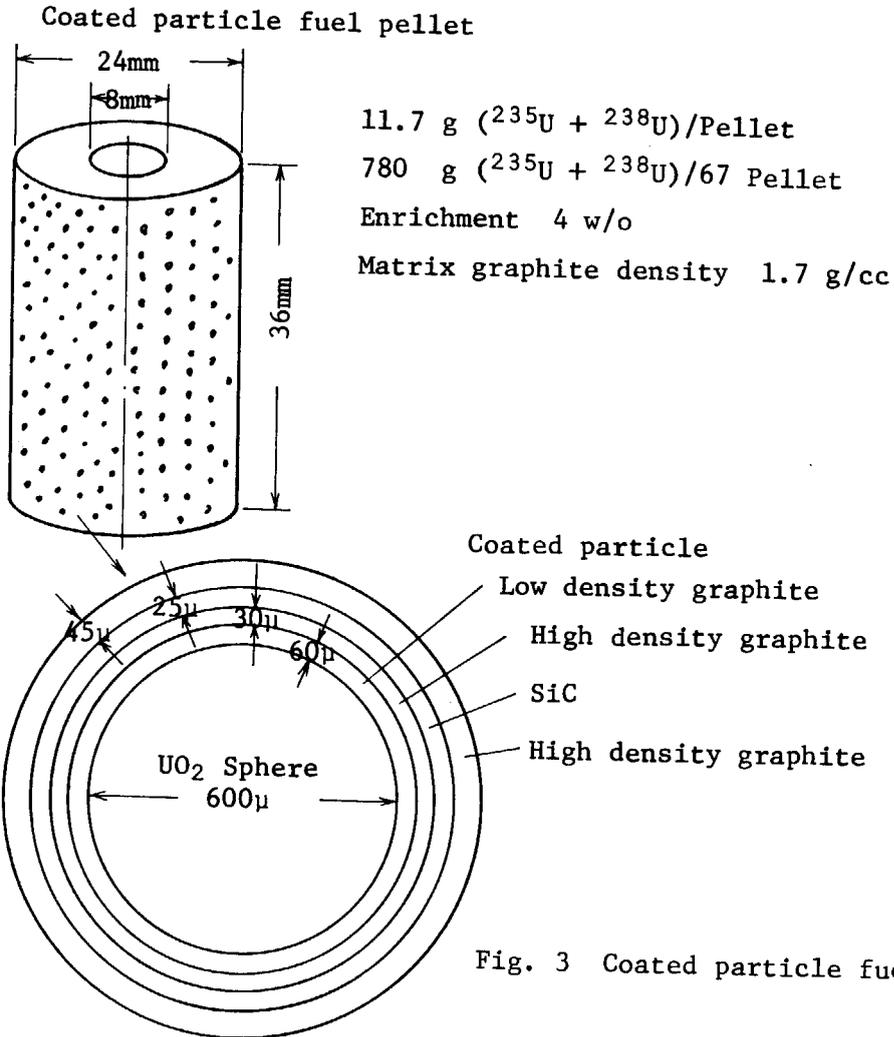


Fig. 3 Coated particle fuel pellet

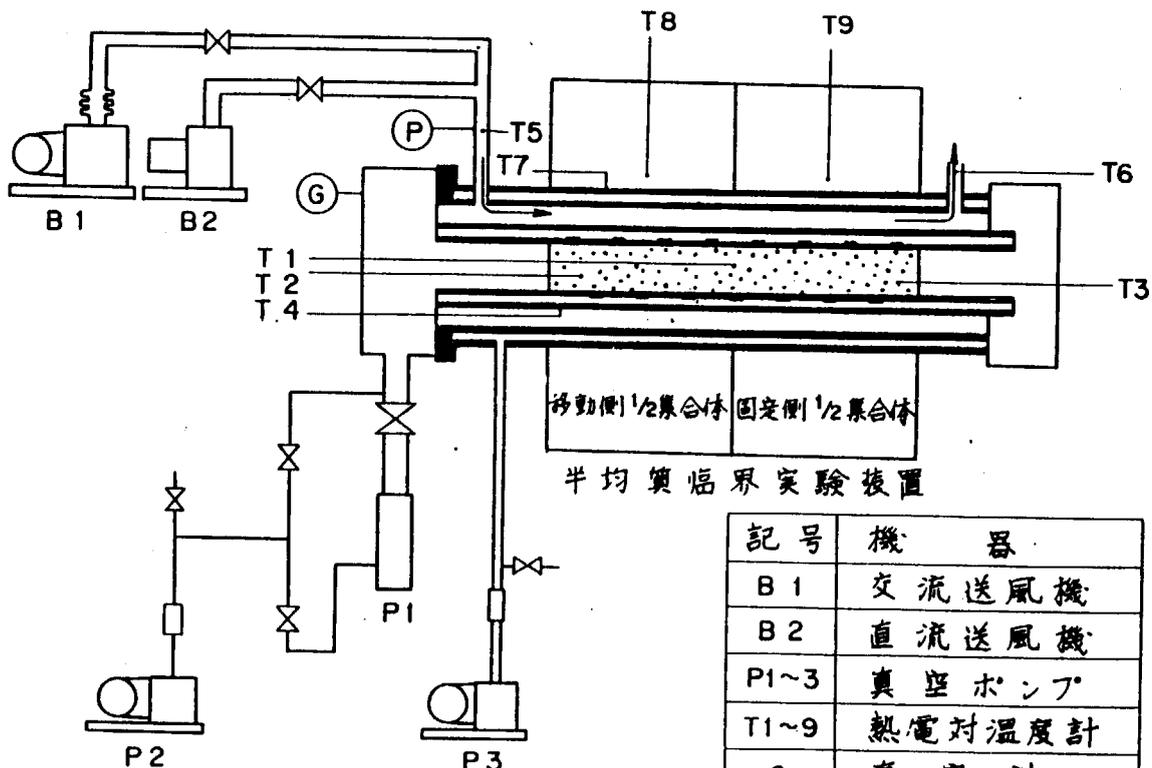


Fig. 4 Block diagram of heating apparatus

記号	機 器
B 1	交流送風機
B 2	直流送風機
P1~3	真空ポンプ
T1~9	熱電対温度計
G	真空計
P	圧力計

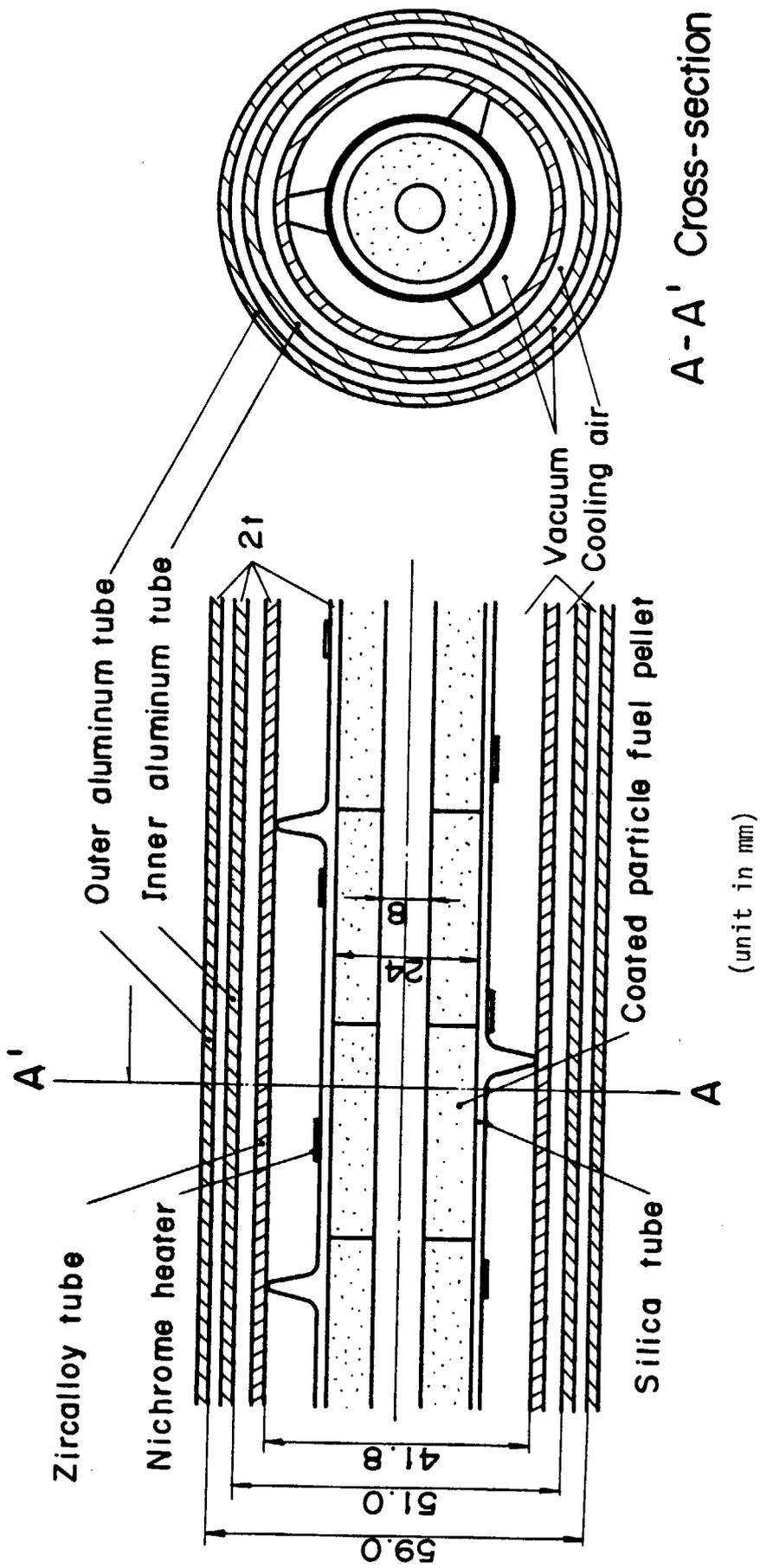


Fig. 5 Cross section of heating tube

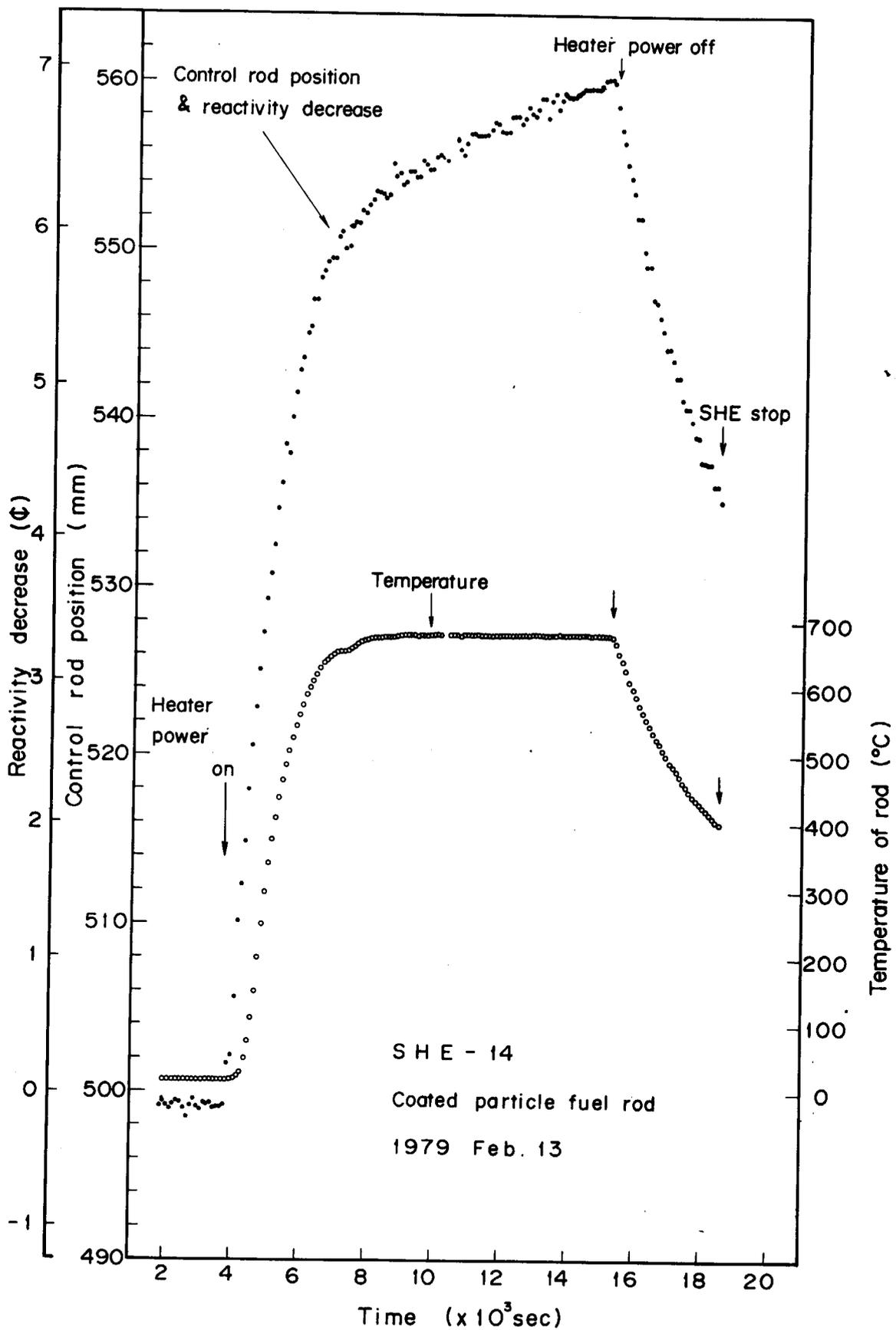


Fig. 6 Reactivity decrease with temperature rise of coated particle fuel rod ($\sim 700^{\circ}\text{C}$)

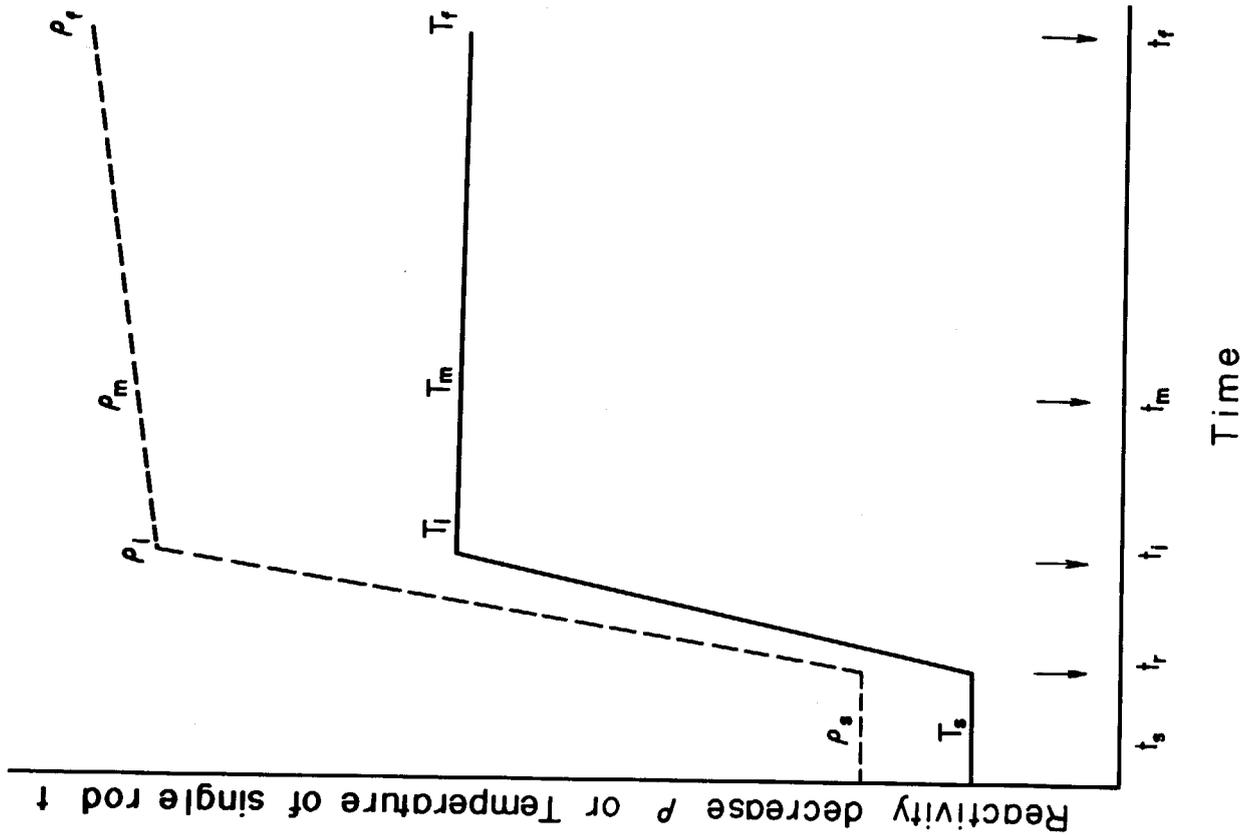


Fig. 7 Simplified behaviour of reactivity change with temperature of coated particle fuel rod for understanding of experiments

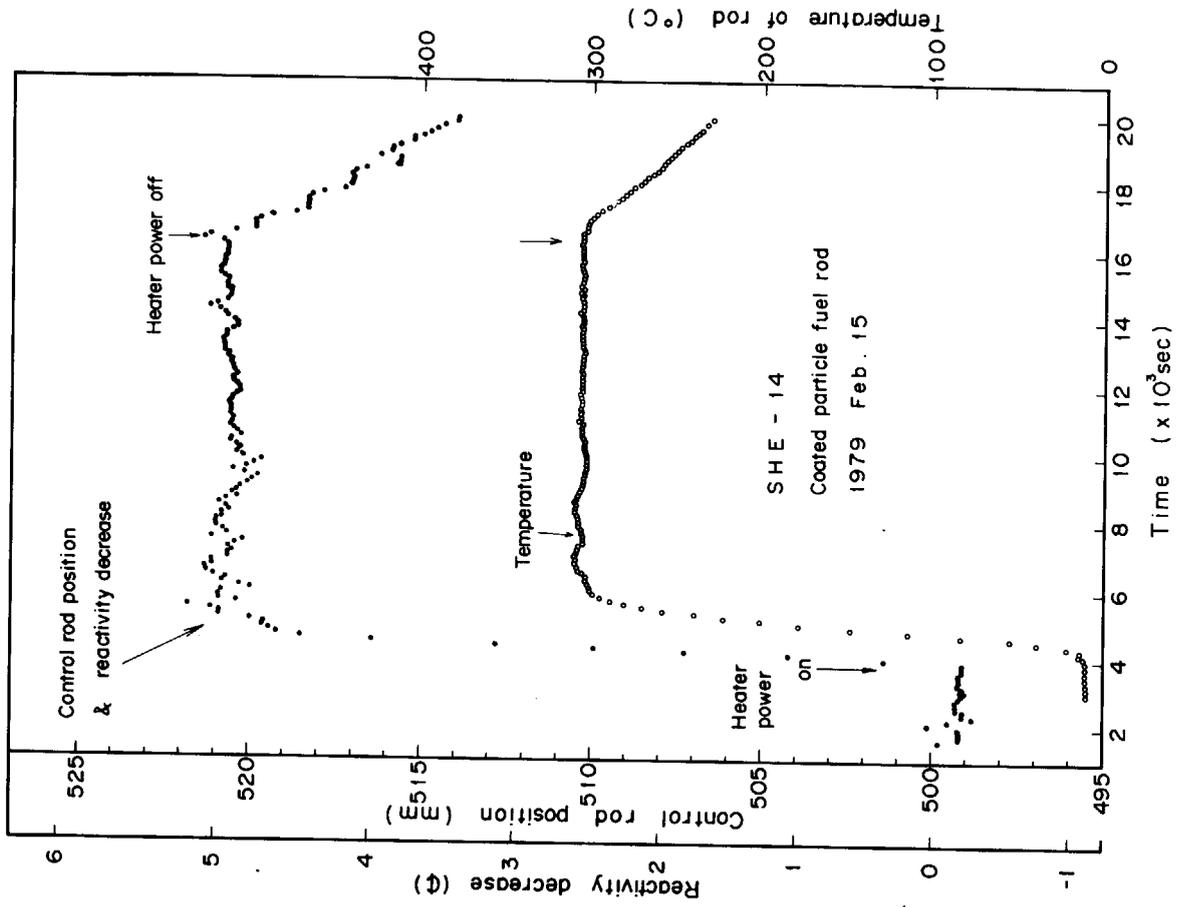


Fig. 8 Reactivity decrease with temperature rise fuel rod ($\sim 300^{\circ}\text{C}$) of coated particle

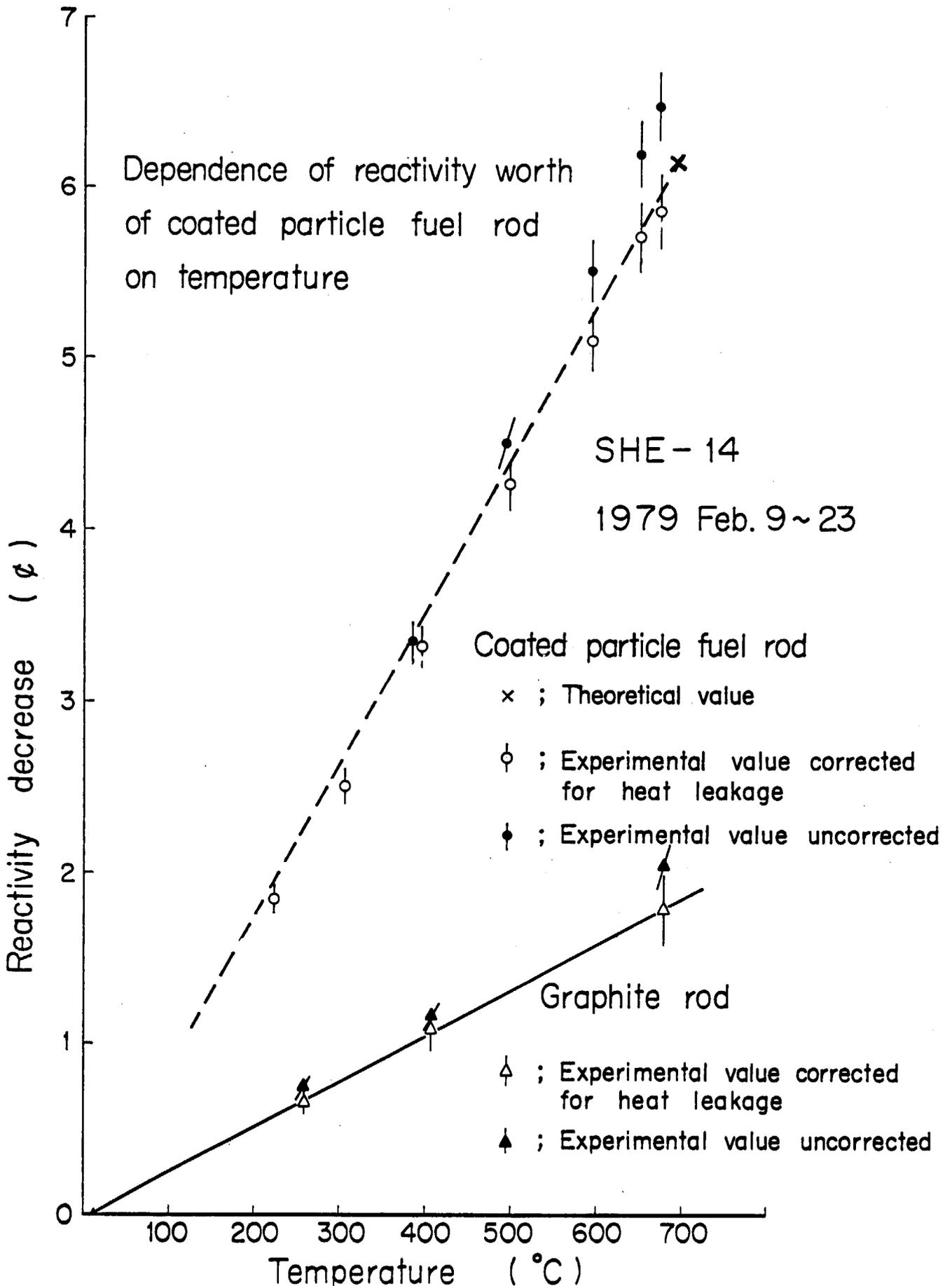


Fig. 9 Comparison between measured and calculated reactivity decrease with temperature rise of coated particle fuel rod

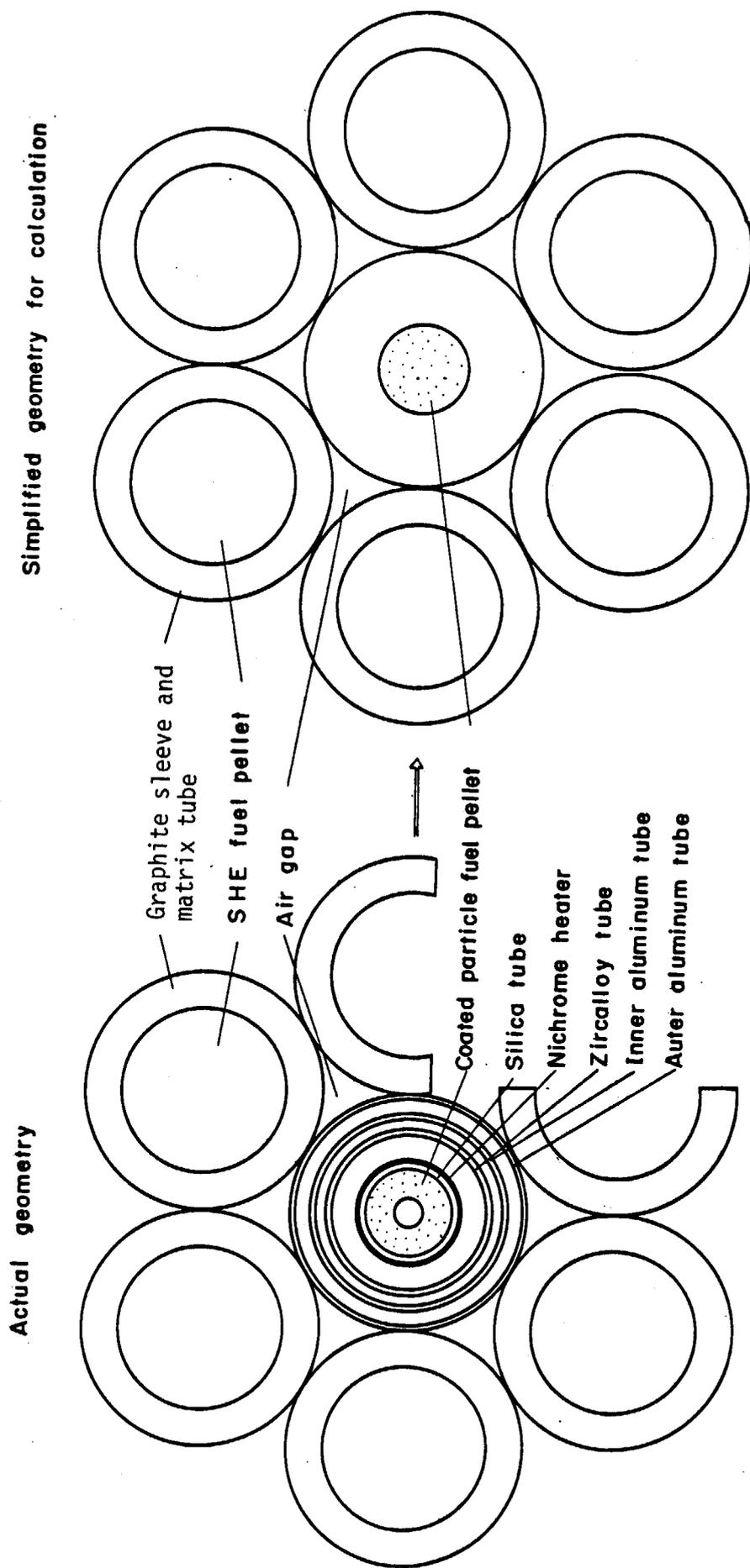


Fig. 10 Simplification of actual geometry for calculation