

落下法による制御棒等価反応度測定における検出器位置依存性, 隣接制御棒干渉効果および燃料装荷分布の影響

三木良太, 伊藤哲夫
小笠原章*, 大西宏幸*

Effects of Detector Position, Adjacent Rod Position and Fuel Loading Distribution on Rod Worth Measurement by Rod Drop Method

by Ryota MIKI, Tetsuo ITOH, Akira OGASAWARA*
and Hiroyuki OHNISHI*

(Received November 7, 1980)

In control rod worth measurement of a nuclear reactor by rod drop method, it is well known that several factors, e. g. detector position, adjacent rod position, fuel loading in core, etc., affect the measured rod worth appreciably. These effects are studied in detail on UTR-Kinki reactor, a modified Argonaut-type zero power reactor with split-core, and it was noted that fuel loading distribution has most significant effect on rod worth measurement, while detector position and adjacent rod position also have considerable but less effects.

KEYWORDS

Control rod, rod worth, rod drop method, two-slab split-core reactor, modified Argonaut-type reactor

I 緒 言

原子炉の大きな負の反応度を測定する手段として、従来からパルス中性子法、中性子源増倍法、中性子源引抜き法および制御棒落下法などが広く用いられている。原子炉の安全設計や運転上の要求から、制御棒の等価反応度測定精度の向上が期待されるようになり、1976年4月にフランス・ガダラッシュ研究所において、「制御棒の反応度値及び出力分布への影響についての測定技術に関する専門家会議」が開催された頃から、炉物理分野での重要な課題の一つとして注目され、1976年10月の日本原子力学会・秋の分科会の指定テーマとして採り上げられ、「さらに解明すべき多くの課題が残されている」ことが指摘された。その後、炉物理の研究¹⁾でも、稼動中の研究炉・臨界集合体に

おける制御棒校正の現状が特集記事として採り上げられるなど、制御棒反応測定には更に検討を要する点が少くない。

近畿大炉 UTR-Kinki (熱出力1W) は、90%濃縮ウラン・平板状 MTR 型燃料を用いた変形アルゴノート型原子炉で、2分割炉心をもち、各炉心の外部反射体中に対称的に2本ずつ制御棒が配置された構造をしており、落下法によって制御棒反応度を測定する場合、検出器位置依存性、隣接制御棒の干渉効果、燃料装荷分布の影響などが、比較的顕著に現われる傾向が認められる。当初は規制法上の規制値の確認に関連して種々条件を変えて測定をはじめたが、その後、系統的に前記の諸効果について測定を行ったので報告する。

II 近畿大炉の概要

2分割された炉心燃料タンクには、それぞれ6本の

* 理工学部原子炉工学科

三木他：落下法による制御棒等価反応度測定

燃料要素が垂直に挿入されており、減速水は燃料タンク内のみではなく、合計 120ℓ にすぎない。燃料タンクの周囲は、高さ 122 cm の黒鉛反射体によって囲まれている。燃料タンク間隔は 46 cm で、結合度は小さく、このため臨界質量は 3,018 g (U-235) と比較的大きい。制御棒は 1 mm 厚の Cd 板で、安全棒とシステム安全棒は同じ寸法の 18 × 18 cm、調整棒は 5 × 5 cm であり、各燃料タンクのすぐ外側の黒鉛反射体中に設けられたスリット内を垂直に上下する。

4本の制御棒のうち、安全棒は2本とも中間位置では停止させることができない設計になっており、上限と下限でのみ停止し、かつ引抜きだけが可能である。また安全棒 #1 が上限位置に到達するまでは、安全棒 #2 の引抜きを行うことができない。このため安全棒の等価反応度は落下法によって測定している。

スクラム時の制御棒の落下時間は、安全棒、シム安全棒とも 320~340 msec である。また設置許可申請書記載の等価反応度の値は、調整棒 0.1% Δk/k 以上、シム安全棒と安全棒は 0.54% Δk/k 以上である。近畿大炉の炉心平面図を Fig. 1 に示す。

燃料要素は平板状 MTR 型燃料板12枚をスペーサー

とピンによって組立てる構造になっており、容易に分解・再組立が可能である。各燃料板は、66×7.6×0.2 cm (ミート部58×6.9×0.1cm) で、1枚当りのU-235装荷量はバラつきがかなり大きく、21.67~22.96 g の範囲であり、組換えによって超過反応度の微細な調整が可能である。燃料タンク内の燃料装荷は均一でなく、意図的にそれぞれ中央部の装荷量を大きく、かつ炉心の中心寄りの装荷を増してある。また各燃料タンクの両端の燃料要素は、反応度調整のため全装荷でない。通常時の各燃料タンク内の装荷状態を Fig. 2 に CORE A として示す。北西隅の N-1 要素は、他の3隅の要素 (N-6, S-1, S-6) より、燃料板1枚分だけ多く装荷されており、従って北(N)側は南(S)側より 21.71 g 装荷量が多くなっている。

III 実験方法

中性子検出器は Westinghouse Model WL-6376 フィッション・チェンバーを使用した。測定は一般に行われている落下法(積分法)による。臨界の判定は充分時間をかけて注意して行った。測定対象の制御

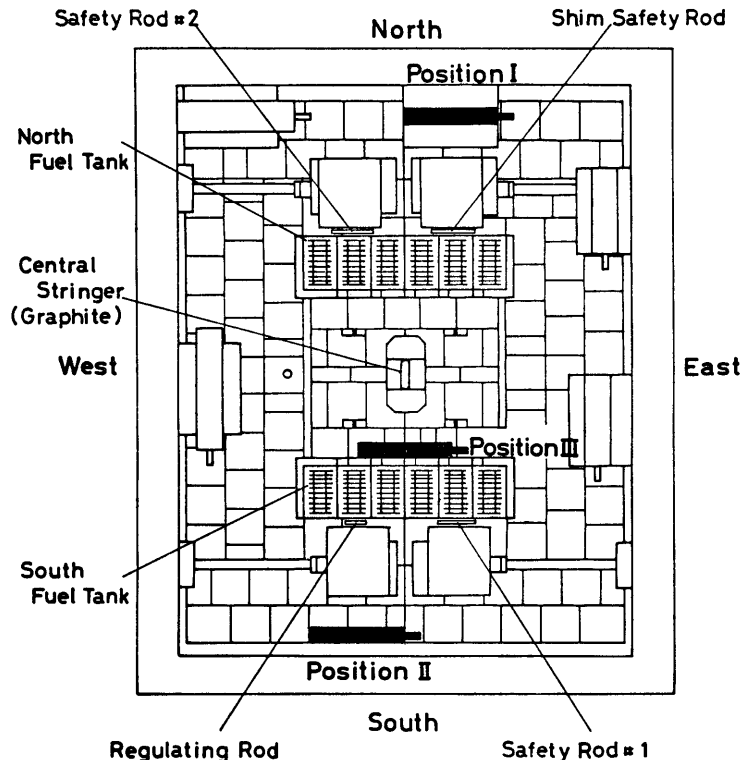


Fig. 1. Reactor core plan of UTR-Kinki reactor. Detector location in the core is indicated as Position I, II, and III, respectively.

Fuel Element Arrangement and U-235 Loadings

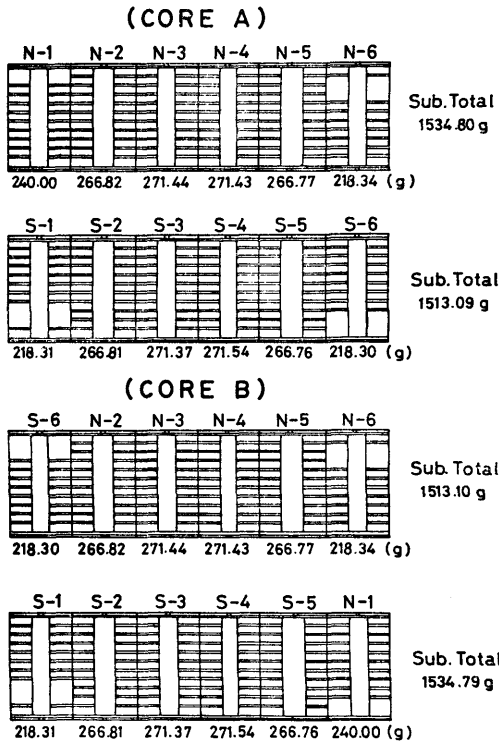


Fig. 2. Fuel element arrangement and U-235 loadings in north and south fuel tanks. Core A...normal loading, and Core B...partially substituted loading.

棒を選択スイッチによって落下させ、制御棒が下限に達するとスクーラーにスタート信号が送られ、スクーラーが計数を開始する。制御棒の落下時間は併設のカウンターに表示され、落下時間が確認できる。落下時間のバラつきは数 msec 以内である。計数は10分間であるが、炉が低出力であり、かつ残留 γ 線による光中性子の発生も極めてわずかなため、バックグラウンドの補正は不要である。反応度は、不感時間の補正をした落下前の平均計数率と落下後の積分計数値から、Hogan の式²⁾を用いて求めた。なお遅発中性子のデータは、炉心構造と構成要素が極めて類似しているアルゴノート炉の値³⁾を用いている。

落下法による制御棒反応度測定における検出器位置依存性を調べるために、検出器を炉心内の種々の位置に移動させて測定を行った。Fig. 1 に Position I, II, III と示してある黒く塗りつぶした位置は、典型的な位置依存性が認められた個所で、後述の測定結果はこの代表位置について示してある。

隣接制御棒の干渉効果を調べるためには、安全棒 #1 と #2 に隣接する調整棒とシム安全棒の引抜き位置をかえて臨界をとる必要があるが、調整棒とシム安全棒は相補的關係にあるため、片方だけを動かすわけにはいかない。また保安規定記載の k_{ex} が 0.185 % $\Delta k/k$ (30°C換算) と低く抑えられているため、等価反応度の大きなシム安全棒の引抜き位置を大きく変更することができない。このため k_{ex} を変化させる必要が生じたが、炉心全体に与える影響を考慮して、Fig. 1 の炉心中央に設けられた黒鉛の中央ストリンガーが分割挿入できることを利用し、全挿入、3/4挿入、2/4挿入、1/4挿入、0挿入と変更して、調整棒位置を一定に保ちながらシム安全棒の引抜き位置を大巾に移動させる方法を用いた。

装荷燃料の分布が落下法による制御棒反応度測定に及ぼす影響を調べる方法として、通常の装荷状態では Fig. 2 の CORE A に示すようにN側がS側より約 22g 装荷が多いことに着目して、対称位置にあるN-1 と S-6 要素を 180 度回転して入替える方法を採用した。この方法では、全装荷量や k_{ex} も変化せず、炉全体の特性の変化が最も少いので、今回の測定目的には適している。入替え後の各燃料タンク内の装荷状態を Fig. 2 に CORE B として示してある。臨界質量に対する変化量は約0.72%に過ぎない。

IV 実験結果

IV. 1. 隣接制御棒の干渉効果

前述のように調整棒とシム安全棒は相補關係にあるので、検出器位置、装荷燃料分布、 k_{ex} を一定に保ち、調整棒とシム安全棒の双方の位置を変えて測定すると隣接制御棒以外の反対側の制御棒の効果も加わるので、隣接制御棒のみの効果を見ることはできない。この場合の安全棒 #1 と #2 の反応度測定値は、安全棒 #1 では隣接する調整棒の引抜き位置が高いほど、従ってシム安全棒が深く挿入されているほど値が大きく、逆に安全棒 #2 では隣接するシム安全棒の引抜き位置が高いほど値が大きく、等価反応度測定値の変化は最大10%をこえることが認められた。

隣接制御棒のみの干渉効果を調べるために、既に述べた中央黒鉛ストリンガーを部分的に挿入して、 k_{ex} を変化させて測定した結果の一例を Fig 3 に示す。○と●印は調整棒引抜き位置 0% と 100% 時の安全棒 #1 の測定値、また△と▲印は同じく安全棒 #2 の測定値を表わしている。ただしシム安全棒の引抜き位置を

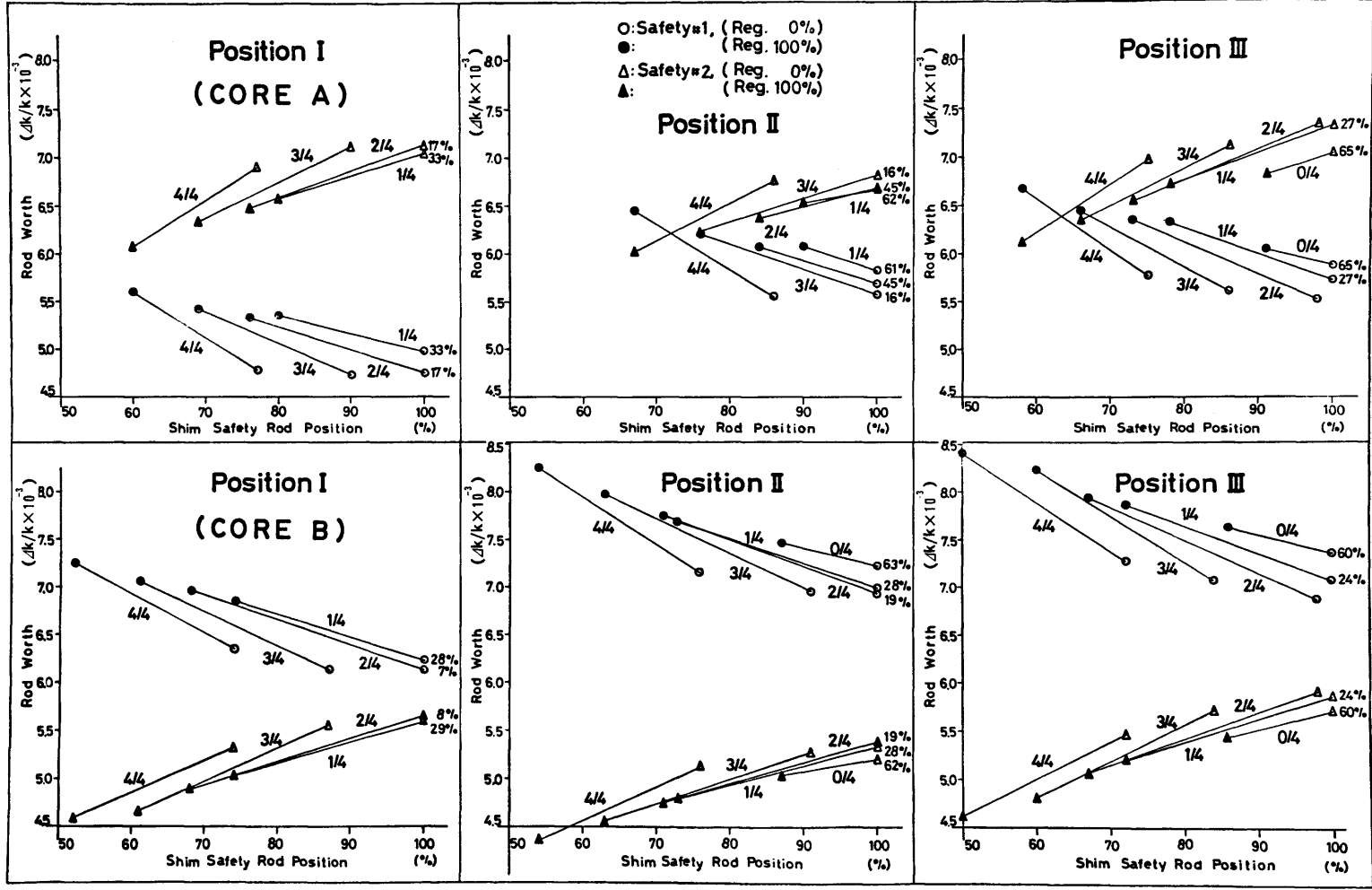


Fig. 3. Rod worths of Safety #1 and #2 measured by rod drop method under various conditions.

100%とした場合は、調整棒を全部引抜くと臨界超過となるので、臨界時の調整棒の引抜き位置を印の傍に%で示してある。なお k_{ex} を同一に保って測定した調整棒引抜き位置0%と100%の印の間を直線で結んでいるが、これは測定値の間の関連を示しているにすぎず、この間の実際の変化はわずかに直線からずれる傾向がある。また印間の線の近くに記した1/4, 4/4などの記号は、中央黒鉛ストリンガーの挿入割合を示したものである。

Fig. 3 で明らかなように、安全棒#1は隣接する調整棒の引抜き位置が一定でも、反対側のシム安全棒の引抜き位置の影響を若干受け、引抜きにつれて測定値は若干増加している。隣接する調整棒の影響は当然大きく、引抜き位置0%と100%の間で安全棒#1の値は最高10数%も変化し、調整棒引抜き位置100%時の値が常に最大である。

安全棒#2は隣接するシム安全棒の影響を強く受け、安全棒#1の測定値とは正反対の傾向を示す。この場合も反対側の調整棒の引抜き位置の影響が若干認められる。シム安全棒は k_{ex} の関係で引抜き位置0%から50%までの範囲の測定が不可能であったが、この変化範囲でも安全棒#2の反応度は#1と同様に最高10数%変動する。シム安全棒引抜き位置が高いほど安全棒#2の値は大きい。

なお以上の隣接制御棒の干渉効果の傾向は、検出器位置や装荷燃料分布状態を変化させてもほぼ同じであるが、等価反応度の値自体は、これらの条件を変えることによって著しい変化を示し、また反対側の制御棒の引抜き位置の影響にも変化が認められる。

IV. 2. 検出器位置依存性

検出器位置を北側燃料タンクの外側でシム安全棒に最も近くした場合 (**Fig. 2** の Position I), 南側燃料タンク南側の調整棒に最も近くにした場合 (Position II), 両燃料タンクの間で南側タンクに接した位置 (Position III) とした場合の安全棒#1と#2の反応度の測定値を **Fig. 3** に示す。検出器依存性は明らかに認められ、Position I と II では大きな変化を生じているが、Position II と III ではあまり著しい変化がない。同一の燃料装荷分布状態では検出器位置が測定対象制御棒に近いほど、その制御棒反応度が大きくなる傾向にあるが、その効果は後述の燃料装荷量の分布と密接な関係があることが **Fig. 3** から明らかである。

IV. 3. 燃料装荷分布の影響

燃料装荷分布が落下法による制御棒反応測定に及ぼ

す影響は極めて大きいことが **Fig. 3** に示されている。CORE A と CORE B では、臨界質量に対してわずかに約0.72%相当の燃料を置き換えたに過ぎないが、図に見られるように全く正反対の測定結果がえられた。安全棒#1と#2の反応度の差が CORE B の Position II と III において極めて大きく、CORE A の Position I をかなり上回っている点が注目される。全般的に見て、同一燃料装荷分布状態では、検出器位置を変えても安全棒#2の反応度の変化が少いのに対して、安全棒#1の方は検出器位置によって大きく変化する傾向が認められた。

V 結 語

落下法による制御棒反応度測定において、測定値に影響を与える因子として指摘されている検出器位置依存性、隣接制御棒の干渉効果、装荷燃料分布状態の影響について、2分割炉心を有する近畿大炉で種々条件を変えて実測した結果、最も大きな影響を与えるのは燃料装荷分布状態であり、検出器位置と隣接制御棒の干渉効果もかなり大きいことを明らかにした。

なお強い相互作用をもつ多数本制御棒の価値の評価法の一つとして、三谷⁴⁾が提唱している“中心に対称位置にある2本の制御棒を見かけ上1本の制御棒”として扱った場合の結果を **Fig. 4** に示す。

Fig. 4 は対称位置にある安全棒#1と#2の和を、検出器位置と燃料装荷分布状態を変えた場合について示したもので、それぞれの条件下での変動は3%以内におさまっており、燃料装荷分布状態の影響がほとんど認められない点が注目されるが、検出器位置依存性はなくなり、検出器位置によって最大10%程度の変化が生じており、単一検出器による測定では、少なくとも2分割炉心の場合、この種の評価法の適用には限界があるようは思われる。

なお本実験は昭和51年度卒研生菱本純次、千世寧、52年度卒研生島孝一、土居薫、53年度卒研生斉藤正、上野格志、沢村東太郎の諸君の協力によって測定したデータを基礎として新たに再測定を行ったもので、以上の諸君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 炉物理の研究, No. 28, (Dec. 1979)
- 2) W. S. Hogan; Nucl. Sci. Eng., 8, 518 (1960)
- 3) W. R. Kimel et al.; Nucl. Sci. Eng., 6, 233 (1959)
- 4) 三谷 浩; 原子力学会秋の分科会 A48 (1976)

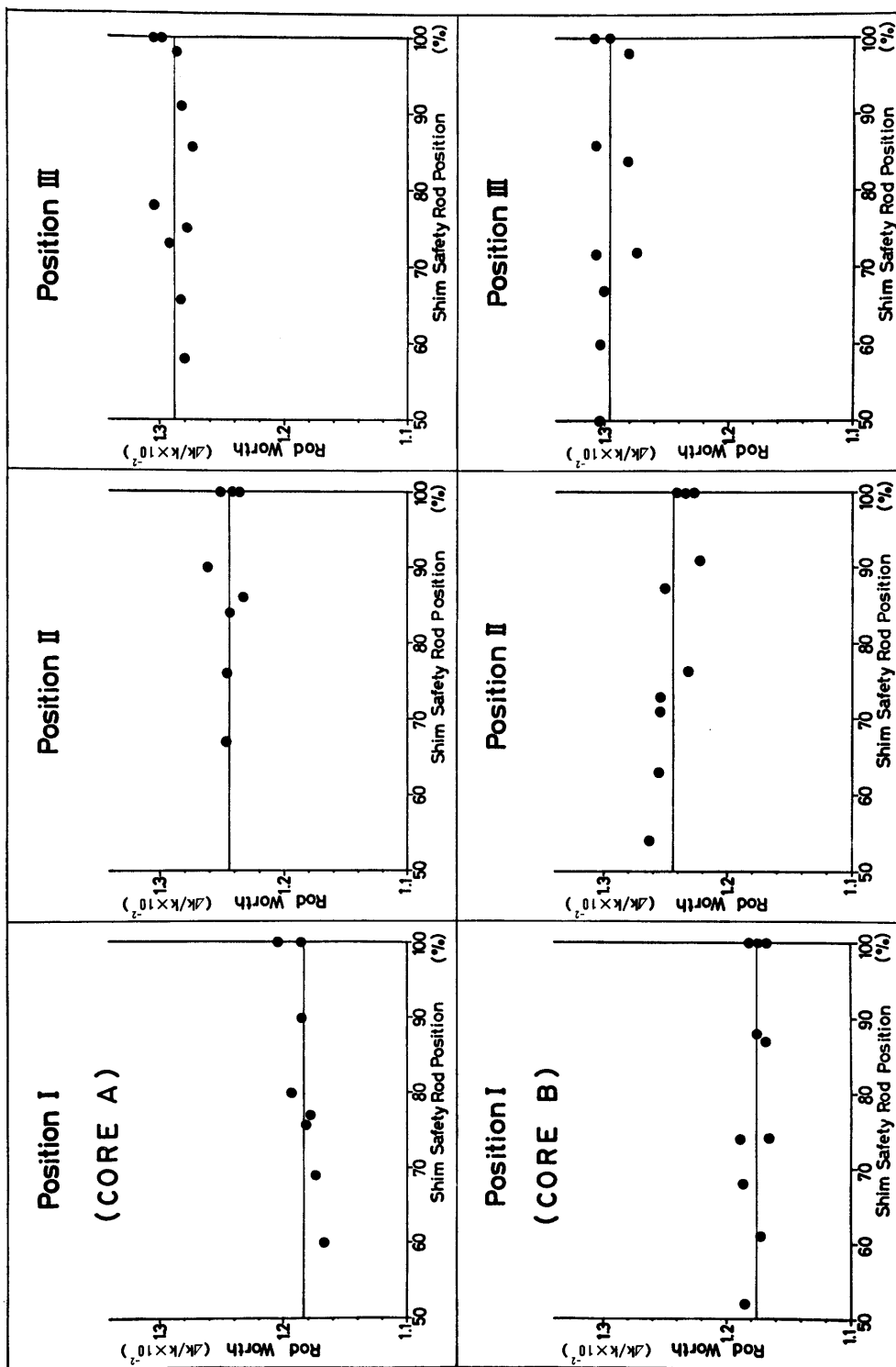


Fig. 4. Sum of the rod worths of Safety #1 and #2 measured by rod drop method under various conditions.