

JAERI-M
85-012

原子炉停止時における炉内核種組成の変化
— SPEEDIのソースタームの情報の観点から —

1985年2月

甲斐 倫明・森内 茂・大久保 収二

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。

入手の問合わせは、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、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒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 Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

原子炉停止時における炉内核種組成の変化
— SPEEDIのソースタームの情報の観点から —

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

甲斐 倫明・森内 茂・大久保収二⁺

(1985年1月21日受理)

原子炉停止後の希ガスまたはヨウ素の核種組成に及ぼす原子炉停止前の炉出力の変化の影響についてNICCAコードを用いて評価した。緊急時環境線量情報予測システムSPEEDIでは、ソースタームとして希ガスの全放出率あるいはスタックモニターの測定値を入力して、各同位体の放出率を推定できるように原子炉停止時の核種組成率が用いられる。希ガスおよびヨウ素の核種の中には半減期が数日以下の短いものが多く、これらの核種の炉内インベントリーは原子炉停止前の運転履歴に強く依存する。したがって、定格運転から原子炉停止に至ると仮定した場合の核種組成率は、原子炉停止前の運転履歴によって半減期の比較的長いものでは過小評価となる。この程度は、炉出力低下率およびその期間、または原子炉停止からの時間によって異なる。線量評価上は、希ガスからの体外被曝は原子炉停止10時間後で約20%高く見積もられ、ヨウ素からの甲状腺被曝では逆に過小評価されることなどが明らかとなった。

+ 安全解析部

Variations in Isotopic Composition of a Reactor at its Shutdown
— from the viewpoint of source terms used by the SPEEDI

Michiaki KAI, Shigeru MORIUCHI and Shuji OHKUBO⁺

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 21, 1985)

The effects of variation in reactor output shortly before shutdown on the evolution of isotopic composition following it were analyzed by the NICCA code for calculating the activity of fission nuclides normally accumulated in fuel rods. In the SPEEDI system, the isotopic composition of noble gas or iodine is employed to evaluate the release rate of each nuclide as source terms using a total amount of these nuclides or measured values with stack monitors etc.. The inventory of noble gas or iodine markedly depends on the operational history of a reactor shortly before its shutdown, since the half-lives of many nuclides among noble gas or iodine are less than a few days. When the shutdown should occur immediately after the continuation of rated output, therefore, the isotopic fraction of nuclides with longer half-lives was underestimated and that with shorter ones was overestimated in comparison with the results obtained considering the variation in reactor output shortly before the shutdown. From the standpoints of dose evaluation, it was found that the external exposure to total noble isotopes was estimated to be at most approximately 20 % higher 10 hour immediately after the shutdown, but the thyroidal exposure to total iodine isotopes was underestimated to be 30 % at maximum.

Keywords: Isotopic Composition, Reactor, Shutdown, SPEEDI, Noble Gas,
Iodine, External Dose, Thyroidal Dose

⁺ Department of Nuclear Safety Evaluation, Tokai, JAERI.

目 次

1. 緒 論	1
2. SPEEDIのソースターム計算	2
3. 炉内核種組成計算	4
4. 計算結果	7
5. 考 察	9
6. 結 論	10
謝 辞	11
参考文献	11

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Calculation of Source Terms for the SPEEDI	2
3. Calculational Methods of Isotopic Composition in Reactor	4
4. Results	7
5. Discussion	9
6. Conclusion	10
Acknowledgements	11
References	11

1. 緒 論

原子力発電所等の原子力施設が万一事故を起こした場合、周辺環境および住民に与える放射線の危険性を速やかに推定し、防災対策を講ずるかどうかを判断することは放射線防護上重要な課題である。放射線の危険性の指標として用いられる線量当量の評価には、一般に、①環境への放出量、②環境における核種移行または放射線輸送、および③レセプターとしてのヒトの3つに分類できる因子が必要である。②および③の線量に及ぼす影響は放射線量または濃度に対して線型に記述されるために、最終的なヒトの被曝線量は放出量と比例関係にある。したがって、放出量の推定誤差はそれに比例してヒトの被曝評価の精度に影響を及ぼすことになる。

昭和56年度から原研で進められてきた緊急時環境線量予測システム (SPEEDI) の開発¹⁾は、原子力施設の事故時に大気中に放射性物質の放出が予期される場合に防災対策上必要な情報を迅速かつより現実的な推定を可能にすることがねらいである。SPEEDIの計算に用いられる放出源データ (ソースターム) は、スタックモニターなどによる事故サイトからの情報や環境モニタリングによる推定データなどを入力する形式をとっている。ソースタームは線量評価上重要な因子であるにもかかわらず、事故という特殊な状況であることもあって、現在だけでなく将来にわたって不確定要素の極めて高いデータであることは間違いない。しかしながら、放出量推定には困難が伴うが、それを補完する有用な情報として核種組成率を準備しておくことは難しくない。ここで取り扱う核種組成とは、原子炉事故で線量評価上重要である放射性希ガス (Kr および Xe) と放射性ヨウ素それぞれの同位体組成率を意味する。炉内に蓄積している時の核種組成が放射性崩壊を別にすればそのままの比率で一般環境まで存在すると仮定することは次のことを前提として認められる。すなわち、炉内から大気中に放出されるまでの核種の移行過程において、物理・化学吸着などで同位体効果によりある特定の同位体だけが分離されることはない。また希ガスについては、Kr と Xe は物理・化学的に全く同一の挙動をとるとのことである。

原子炉停止時の炉内核種組成が正確に予測できるならば、上記のことを前提で情報として不十分なソースタームに関連した種々の情報を活用できるものにすることが可能である。例えば、スタックモニターからは全放出率に相当する量しか測定することができないが、核種組成データを用いることで、希ガスからの寄与が大部分の場合には各々の同位体の放出率を推定することができる。また、環境モニタリングによって得られるある卓越核種の情報、たとえば、I-131の濃度やXe-133からの照射線量率などのデータから推定される放出率を用いて他の同位体の放出率を算定することもできる。ここで注意しておくことは、現在のSPEEDIではスタックモニターからのデータ以外は全て放出率 (Ci/hr) の形でしか入力できないことである。I-131の環境中での濃度やXe-133からの照射線量率から放出率を推定する機能はない。この点については、今後のこの分野の研究成果が期待される。

原子炉停止時の炉内核種組成は、炉型、燃焼度および停止前までの運転履歴などによって決まる。原子炉停止からは核分裂生成物のそれぞれの放射性崩壊および崩壊連鎖によって炉内核

種組成が決定される。すなわち、燃焼および冷却計算から求められる核分裂生成物の炉内インベントリーをもとに核種組成は算定される。希ガスやヨウ素の同位体については、それらの半減期が数日以内と短いものが多く、それらの炉内インベントリーは原子炉停止前の運転履歴に強く依存する。現在のSPEEDIでは、事故前の運転履歴を考慮しておらず、定格運転時の核種組成率を炉型と炉内平均燃焼度の関数としてしか備えていない¹⁾。したがって、現在のSPEEDIの計算では、事故時に原子炉停止直前の炉出力変化が想定される場合、その程度や期間によって結果に著しい影響をもたらすことになる。本報告では、事故前の運転履歴情報として炉出力の低下割合およびその継続期間をパラメータとしたときの核種組成率に及ぼす効果について調べた。この結果をもとに、現在のSPEEDIのもつソースターム推定のための補助機能の信頼性を明らかにし、今後の改良のための情報とした。

2. SPEEDIのソースターム計算

(1) 概要

SPEEDIでは、放出源情報はシステム外部から入るものとして、すなわち計算のための入力データとして取り扱っている。しかし、事故後早急に詳細な情報が入手される可能性は小さく、入手しうるデータをもとに計算に必要なデータ、すなわち光子エネルギーや崩壊定数などを決めるために核種毎の放出率を推定する必要がある。SPEEDIでは、放出源情報を次の4タイプ(情報モードと呼ぶ)に分けて外部から入手しうるデータに応じて入力が行えるようになっている。

- ① 希ガス^{*}) またはヨウ素^{***)}の全放出率^{***)}(Ci/hr)を入力する。または、希ガスまたはヨウ素のある特定の卓越核種、たとえばXe-133やI-131など、の放出率を入力する。詳細な同位体組成のデータが入手されない場合またはモニタリングなどによって卓越核種のデータだけが入手されている場合に用いる。
- ② 希ガスについては、事故サイトのスタックモニター(電離箱検出器とする)の値を、ヨウ素については、I-131の放出率をそれぞれ入力する。事故サイトで放出率に関するデータが測定される場合に用いる。
- ③ 希ガスまたはヨウ素の核種すべての放出率を入力する。詳細な同位体組成のデータが入手される場合に用いる。
- ④ 希ガスおよびヨウ素を含めた主要な核分裂生成核種の放出率を入力する。SPEEDIが

*) ^{83}Kr , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{90}Kr , $^{131\text{m}}\text{Xe}$, ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{137}Xe , ^{138}Xe , ^{139}Xe

**) ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{136}I

***) 放出量と放出継続時間が入手される場合には一定な連続放出を仮定して放出率を決める。放出率の時間変化が放出源情報として入手される場合には濃度計算の過程でこの条件を入力することになっている。

種組成が決定される。すなわち、燃焼および冷却計算から求められる核分裂生成物の炉内インベントリーをもとに核種組成は算定される。希ガスやヨウ素の同位体については、それらの半減期が数日以内と短いものが多く、それらの炉内インベントリーは原子炉停止前の運転履歴に強く依存する。現在のSPEEDIでは、事故前の運転履歴を考慮しておらず、定格運転時の核種組成率を炉型と炉内平均燃焼度の関数としてしか備えていない¹⁾。したがって、現在のSPEEDIの計算では、事故時に原子炉停止直前の炉出力変化が想定される場合、その程度や期間によって結果に著しい影響をもたらすことになる。本報告では、事故前の運転履歴情報として炉出力の低下割合およびその継続期間をパラメータとしたときの核種組成率に及ぼす効果について調べた。この結果をもとに、現在のSPEEDIのもつソースターム推定のための補助機能の信頼性を明らかにし、今後の改良のための情報とした。

2. SPEEDIのソースターム計算

(1) 概 要

SPEEDIでは、放出源情報はシステム外部から入るものとして、すなわち計算のための入力データとして取り扱っている。しかし、事故後早急に詳細な情報が入手される可能性は小さく、入手しうるデータをもとに計算に必要なデータ、すなわち光子エネルギーや崩壊定数などを決めるために核種毎の放出率を推定する必要がある。SPEEDIでは、放出源情報を次の4タイプ(情報モードと呼ぶ)に分けて外部から入手しうるデータに応じて入力が行えるようになっている。

- ① 希ガス^{*}) またはヨウ素^{**}) の全放出率^{***}) (Ci/hr) を入力する。または、希ガスまたはヨウ素のある特定の卓越核種、たとえばXe-133やI-131など、の放出率を入力する。詳細な同位体組成のデータが入手されない場合またはモニタリングなどによって卓越核種のデータだけが入手されている場合に用いる。
- ② 希ガスについては、事故サイトのスタックモニター(電離箱検出器とする)の値を、ヨウ素については、I-131の放出率をそれぞれ入力する。事故サイトで放出率に関するデータが測定される場合に用いる。
- ③ 希ガスまたはヨウ素の核種すべての放出率を入力する。詳細な同位体組成のデータが入手される場合に用いる。
- ④ 希ガスおよびヨウ素を含めた主要な核分裂生成核種の放出率を入力する。SPEEDIが

*) ^{83}Kr , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{90}Kr , $^{131\text{m}}\text{Xe}$, ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{137}Xe , ^{138}Xe , ^{139}Xe

**) ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{136}I

***) 放出量と放出継続時間が入手される場合には一定な連続放出を仮定して放出率を決める。放出率の時間変化が放出源情報として入手されるときには濃度計算の過程でこの条件を入力することになっている。

対象とする核種は66核種である。希ガスまたはヨウ素の同位体のうちの単一の核種だけが放出される場合（たとえば、再処理工場からのKr - 85 や I - 129 ）やCs - 137 , Sr - 90などのエアロゾル核種が放出される場合などに用いる。

以上4つの情報モードのうち①と②は、SPEEDIの保有する核種組成データを用いて計算に必要な核種毎の放出率を推定する。

(2) 核種放出率の推定方法

情報モード①では以下の式に従って、原子炉停止時に換算した放出率を推定する。

i) 希ガスまたはヨウ素の全放出率を入力する場合

$$Q_i = \{ Q / (\sum_i P_i \cdot e^{-\lambda_i (t - t_0)}) \} \cdot P_i \quad (2.1)$$

ここで

Q ; 希ガスまたはヨウ素の全放出率

Q_i ; 原子炉停止時に換算した希ガスまたはヨウ素の核種 i の放出率

P_i ; 原子炉停止時の希ガスまたはヨウ素の核種 i の組成率

λ_i ; 希ガスまたはヨウ素の核種 i の崩壊定数

t ; 放出率Qを評価した時刻

t₀ ; 原子炉停止時刻

ii) 希ガスまたはヨウ素の卓越核種の放出率が入力される時

$$Q_i = \{ Q_k / e^{-\lambda_k \cdot (t - t_0)} \} \cdot (P_i / P_k) \quad (2.2)$$

ここで

λ_k ; 希ガスまたはヨウ素の卓越核種 k の崩壊定数

Q_k ; 希ガスまたはヨウ素の卓越核種 k の放出率

P_k ; 原子炉停止時の希ガスまたはヨウ素の卓越核種 k の組成率

情報モード②では、以下の式に基づいて、原子炉停止時に換算した放出率を推定する。希ガスに対するスタックモニターの読取値をR (mR/hr)とし、同一のモニターで既知の核種で調べに校正定数をK₀ (mR/hr/Ci/m³)とすると、空気の吸収エネルギーに照射線量率は比例するので、

$$\left(\frac{R}{K_0} \right) = \left[\sum_i \{ P_i \cdot q_T \cdot e^{-\lambda_i (t - t_0)} \cdot E_{fi} \cdot \mu_{en}(E_{ai}) \} \right] / \{ E_{f0} \cdot \mu_{en}(E_{a0}) \} \quad (2.3)$$

$$q_i = P_i \cdot q_T \quad (2.4)$$

ここで

q_T ; 原子炉停止時に換算した全希ガスの濃度 (Ci/m³)

μ_{en} ; 空気の質量エネルギー吸収係数 (cm²/g)

q_i ; 原子炉停止時に換算した希ガス i の濃度 (Ci/m³)

E_{fi} ; 核種 i の実効エネルギー (MeV/dis.)

E_{ai} ; 核種 i の平均エネルギー (MeV/ photon)

E_{fo} ; 校正ガスの実効エネルギー (MeV/ dis.)

E_{ao} ; 校正ガスの平均エネルギー (MeV/ photon)

の関係式が成り立つ。実効エネルギーおよび平均エネルギーは次の式で表わされる。

$$E_{fi} = \sum_j (f_{ij} \cdot E_{ij}) \quad (2.5)$$

$$E_{ai} = \left\{ \sum_j (f_{ij} \cdot E_{ij}) \right\} / \left(\sum_j f_{ij} \right) \quad (2.6)$$

ここで

E_{ij} ; 核種 i の放出する光子 j のエネルギー (MeV)

f_{ij} ; E_{ij} の崩壊あたりの放出率 (dis⁻¹)

スタックからの排気量を w (m³/ hr) とすると, (2.3) と (2.4) 式を用いて Q_i は次のように求められる。

$$Q_i = q_i \cdot w$$

$$= \left(\frac{R}{K_o} \right) \times \frac{P_i \cdot E_{fo} \cdot \mu_{en}(E_{ao})}{\left\{ \sum_i P_i \cdot e^{-\lambda_i(t-t_o)} \cdot E_{fi} \cdot \mu_{en}(E_{ai}) \right\}} \times w \quad (2.7)$$

以上の式で、SPEEDIで使用者が入力するパラメータは、 Q 、 Q_k 、 R/K_o 、 t および t_o である。その他のデータは、原子炉停止時の希ガスまたはヨウ素の核種組成が炉型と燃焼度の関数として核種組成データファイルに、崩壊定数および光子のエネルギーデータなどが核種物理データファイルに各々保有されている。

3. 炉内核種組成計算

(1) 計算の基礎

核分裂によって生成される核種の原子数は一般に次の式に従う。

$$\frac{dN}{dt} = (f \sum_f - N \cdot \sigma_a) \varphi - \lambda N + \sum_i \lambda_i N_i \quad (3.1)$$

ここで

N ; 原子数

f ; 核分裂生成率

\sum_f ; 核分裂マクロ断面積

σ_a ; 中性子吸収断面積

φ ; 中性子フルエンス率

λ ; 崩壊定数

E_{ai} ; 核種 i の平均エネルギー (MeV/photon)

E_{fo} ; 校正ガスの実効エネルギー (MeV/dis.)

E_{ao} ; 校正ガスの平均エネルギー (MeV/photon)

の関係式が成り立つ。実効エネルギーおよび平均エネルギーは次の式で表わされる。

$$E_{fi} = \sum_j (f_{ij} \cdot E_{ij}) \quad (2.5)$$

$$E_{ai} = \left\{ \sum_j (f_{ij} \cdot E_{ij}) \right\} / \left(\sum_j f_{ij} \right) \quad (2.6)$$

ここで

E_{ij} ; 核種 i の放出する光子 j のエネルギー (MeV)

f_{ij} ; E_{ij} の崩壊あたりの放出率 (dis⁻¹)

スタックからの排気量を w (m³/hr) とすると, (2.3) と (2.4) 式を用いて Q_i は次のように求められる。

$$Q_i = q_i \cdot w$$

$$= \left(\frac{R}{K_o} \right) \times \frac{P_i \cdot E_{fo} \cdot \mu_{en}(E_{ao})}{\left\{ \sum_i P_i \cdot e^{-\lambda_i(t-t_o)} \cdot E_{fi} \cdot \mu_{en}(E_{ai}) \right\}} \times w \quad (2.7)$$

以上の式で, SPEEDI で使用者が入力するパラメータは, Q , Q_k , R/K_o , t および t_o である。その他のデータは, 原子炉停止時の希ガスまたはヨウ素の核種組成が炉型と燃焼度の関数として核種組成データファイルに, 崩壊定数および光子のエネルギーデータなどが核種物理データファイルに各々保有されている。

3. 炉内核種組成計算

(1) 計算の基礎

核分裂によって生成される核種の原子数は一般に次の式に従う。

$$\frac{dN}{dt} = (f \Sigma_f - N \cdot \sigma_a) \varphi - \lambda N + \sum_i \lambda_i N_i \quad (3.1)$$

ここで

N ; 原子数

f ; 核分裂生成率

Σ_f ; 核分裂マクロ断面積

σ_a ; 中性子吸収断面積

φ ; 中性子フルエンス率

λ ; 崩壊定数

λ_i ; 親核種 i の崩壊定数

N_i ; 親核種 i の原子数

原子炉停止後は、(3.1)で中性子フルエンス率をゼロした式、すなわち

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + \lambda_i N_i \quad (3.2)$$

に核分裂生成核種の原子数は従うことになる。(3.1)または(3.2)において、対象とされる主要な核分裂生成核種の数だけの連立微分方程式を解くことで、燃焼または冷却計算を行う。

簡単のために、(3.1)式で親核種からの生成項がないとすると、(3.1)式の解は次のようになる。

$$N(t) = N(0) \cdot \exp(-\lambda t) + \frac{f \sum_f \cdot \varphi}{\lambda + \sigma_a \varphi} \left[1 - \exp\{-(\lambda + \sigma_a \varphi) t\} \right] \quad (3.3)$$

中性子吸収断面積が無視できる場合、放射能は原子数に崩壊定数を乗ずることで

$$A(t) = f \cdot \sum_f \cdot \varphi (1 - \exp(-\lambda t)) + A_0 \exp(-\lambda t) \quad (3.4)$$

となる。 A_0 は中性子フルエンス率が φ_0 から φ に変化する直前の放射能で

$$A_0 = f \cdot \sum_f \cdot \varphi_0 \quad (3.5)$$

とすると、 $A(t)$ の A_0 に対する割合は

$$\frac{A(t)}{A_0} = \exp(-\lambda t) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_0} \right) + \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad (3.6)$$

となる。この式は、 $A(t)/A_0$ が放射性崩壊による減衰を示す指数項と中性子フルエンス率の変化割合とだけに依存していることを示している。(3.6)式から、長期間定格で運転されてきた原子炉がその出力を φ/φ_0 に低下させてからの時間に比べて半減期が十分短い核種については、そのときの $A(t)/A_0$ は φ/φ_0 に等しくなる。つまり、短半減期核種の放射能は原子炉出力の低下に依存して低下する。一方、 t に比べて半減期が十分長い核種については、 $A(t)/A_0$ は1に等しくなることがわかる。したがって、原子炉出力の低減率および出力が低下してから原子炉が停止するまでの時間に依存して原子炉内インベントリーは変化する。

SPEEDIでは、核種組成率を次のように定義して用いている。

$$f_i(t) = A_i(t) / \sum_i A_i(t) \quad (3.7)$$

この式では、希ガス(Kr, Xe)15核種、ヨウ素7核種の各々総放射能を1として組成率を求める。組成率の $t=0$ のそれに対する比は、

$$\frac{f_i(t)}{f_{i0}} = \frac{A_i(t)}{A_{i0}} \cdot \left(\frac{\sum_i A_{i0}}{\sum_i A_i(t)} \right) \quad (3.8)$$

ここで

$$f_{i0} = f_i(0)$$

$$A_{i0} = A_i(0)$$

である。本報告は、 $f_i(t)$ の特性を調べることが目的であるので、(3.6)式で見た特性を組成率で見直してみる必要がある。定格運転から炉出力が低下してから原子炉が停止するまでの時間をTとすると、Tに比べて半減期の十分長い核種は、 $A_i(T)/A_{i0} \approx 1$ であるから、

$$\frac{f_i(T)}{f_{i0}} = \left(\frac{\sum_i A_{i0}}{\sum_i A_i(T)} \right) > 1 \quad (3.10)$$

となる。Tに比べて半減期の十分短い核種は $\phi/\phi_0 = n_f$ とすると、

$$\frac{f_i(T)}{f_{i0}} = n_f \cdot \frac{\sum_i (a_i + b_i)}{n_f \cdot \sum_i a_i + \sum_i b_i} < 1 \quad (3.11)$$

ここで

a_i ; Tに比べて半減期の短い核種

b_i ; Tに比べて半減期の長い核種

となる。したがって、炉出力変化を考慮しない組成率を炉出力の過渡変化が起こっている場合に比べると、Tに比べて半減期の長い核種は過小評価となり、半減期の短い核種は過大評価となる。

以上の簡単な計算による核種組成についての考察は、大まかな傾向を把握することができるがさらに詳細な核種の連鎖なども考慮して、(3.8)および(3.9)式で表わされる量について定量的に検討することが必要である。実際の燃焼・冷却計算に用いた計算方法および計算コードの概要を次に述べる。

(2) 計算方法とコードの概要

核種インベントリーは、(3.1)式を用いて計算される。PWRとBWRの平常運転時の原子炉出力と照射時間を入力データとして核種生成崩壊計算コード(COMRAD^{*})により燃焼度の関数として平常時の核種インベントリーデータファイルを作成する。これを基礎データとして、3つの計算ステップを構成する。計算ステップ1では、燃料交換の炉心分割領域ごとの燃焼度を入力して、各領域における核種インベントリーを求める。計算ステップ2では、事故による原子炉停止から溯った数日間の炉出力時間変化に対して炉心領域毎の各核種インベントリーを求める。計算ステップ3では、炉心各領域の体積と必要な核種を指定し、全炉心に内蔵する核種の量を算出する。以上の計算フローをFig. 1に示す。この結果を用いて、

$$f_i(t) = A_i(t) / \sum_i A_i(t) \quad (3.12)$$

$$\frac{f_i(t)}{f_{i0}(t)} = \frac{A_i(t)}{A_{i0}(t)} \left(\frac{\sum_i A_{i0}(t)}{\sum_i A_i(t)} \right) \quad (3.13)$$

*) ORIGENコード^{4), 5)}を原研用に改造したコードである。

ここで

t ; 原子炉停止後からの時間

$f_i(t)$; 過渡変化を考慮したときの組成率

$f_{i_0}(t)$; 過渡変化を考慮しないときの組成率

$A_i(t)$; 過渡変化を考慮したときのインベントリー

$A_{i_0}(t)$; 過渡変化を考慮しないときのインベントリー

で表わされる組成率および組成率比を計算する。

4. 計 算 結 果

(1) $f_i(t)$ の原子炉停止後の変化

燃焼度 30,000 MWD/MTU, T (定格運転から炉出力が低下して原子炉が停止するまでの日数) = 1 日とし, 炉出力低下が定格の 100% すなわち低下がないときの $f_i(t)$ を, 希ガスの場合 Fig. 2~4 に, ヨウ素の場合 Fig. 5~6 にそれぞれ示す。希ガスの中では, 原子炉停止時から Xe-133 の組成率が最も大きい。原子炉停止 1 時間後では, Xe-133, Kr-88, Xe-135, Kr-87, Xe-135m, Kr-85m で約 90% を占める。原子炉停止 10 時間後になると, Xe-133 と Xe-135 が約 90% を占めるようになる。原子炉停止 10 時間以降は, Xe-135 の減衰で Xe-133 が 400 時間後ぐらいまでは 90% 以上を占める。さらに, 400 時間以降になると半減期 11.77 日の Xe-131m, 半減期 10.7 年の Kr-85 が組成の上で見かけ上増加してくる。ヨウ素については, 原子炉停止 1 時間後までは, I-129 および I-136 を除く 5 核種が 20% 前後の組成率ではほぼ一様に存在している。原子炉停止 10 時間以降になると, I-131, I-132, I-133 の 3 核種が主要な核種となり, 500 時間以降では半減期 8.04 日の I-131 が半減期 1600 万年の I-129 のレベルに減衰するまで 90% 以上を占める。以上の核種組成変化は, 原子炉停止時の核種インベントリーに直接依存して決まるものである。核種インベントリーに及ぼす燃焼度の影響は, 定格運転の場合 Fig. 7 に示す通りで, 特定の核種を除けば無視できる。希ガスの場合, Kr-85 は, 燃焼度に依存してそのインベントリーが変化する核種であるが, 組成率は小さく原子炉停止約 50 時間後までは高々 1% である。しかし, 原子炉停止 50 時間以降は Kr-85 の評価には, 燃焼度の関数として捉えた方がよい。ヨウ素の場合は, 長半減期核種である I-129 のインベントリーが十分小さいので, 燃焼度による組成の変化は無視できる。

(2) $f_i(t)/f_{i_0}(t)$ の原子炉停止後の変化

原子炉出力の低下を定格運転のときの割合 R (%) で表わし, その期間 T とともに核種組成に及ぼす影響を調べる。

1) R = 75%, 燃焼度 30,000 MWD/MTU の場合

T = 1 H のときの結果を Fig. 8~12 に, T = 3 日および T = 7 日の結果をそれぞれ Fig. 13~17, Fig. 18~22 に示す。一般に, 希ガスについては, Kr-85, Xe-131m, Xe-133, Xe-135m の比較的半減期の長い核種は組成率比 ($f_i(t)/f_{i_0}(t)$) は原子炉停止後数 10 時間にわたって 1 より大きく, その他の半減期の短い核種の組成率比は 1 より小さい。その

ここで

t ; 原子炉停止後からの時間

$f_i(t)$; 過渡変化を考慮したときの組成率

$f_{i_0}(t)$; 過渡変化を考慮しないときの組成率

$A_i(t)$; 過渡変化を考慮したときのインベントリー

$A_{i_0}(t)$; 過渡変化を考慮しないときのインベントリー

で表わされる組成率および組成率比を計算する。

4. 計 算 結 果

(1) $f_i(t)$ の原子炉停止後の変化

燃焼度 30,000 MWD/MTU, T (定格運転から炉出力が低下して原子炉が停止するまでの日数) = 1日とし、炉出力低下が定格の100%すなわち低下がないときの $f_i(t)$ を、希ガスの場合 Fig. 2~4 に、ヨウ素の場合 Fig. 5~6 にそれぞれ示す。希ガスの中では、原子炉停止時から Xe-133 の組成率が最も大きい。原子炉停止1時間後では、Xe-133, Kr-88, Xe-135, Kr-87, Xe-135m, Kr-85m で約90%を占める。原子炉停止10時間後になると、Xe-133 と Xe-135 が約90%を占めるようになる。原子炉停止10時間以降は、Xe-135 の減衰で Xe-133 が400時間後ぐらいまでは90%以上を占める。さらに、400時間以降になると半減期 11.77 日の Xe-131m、半減期 10.7 年の Kr-85 が組成の上で見かけ上増加してくる。ヨウ素については、原子炉停止1時間後までは、I-129 および I-136 を除く5核種が20%前後の組成率ではほぼ一様に存在している。原子炉停止10時間以降になると、I-131, I-132, I-133 の3核種が主要な核種となり、500時間以降では半減期 8.04 日の I-131 が半減期 1600 万年の I-129 のレベルに減衰するまで90%以上を占める。以上の核種組成変化は、原子炉停止時の核種インベントリーに直接依存して決まるものである。核種インベントリーに及ぼす燃焼度の影響は、定格運転の場合 Fig. 7 に示す通りで、特定の核種を除けば無視できる。希ガスの場合、Kr-85 は、燃焼度に依存してそのインベントリーが変化する核種であるが、組成率は小さく原子炉停止約50時間後までは高々1%である。しかし、原子炉停止50時間以降は Kr-85 の評価には、燃焼度の関数として捉えた方がよい。ヨウ素の場合は、長半減期核種である I-129 のインベントリーが十分小さいので、燃焼度による組成の変化は無視できる。

(2) $f_i(t)/f_{i_0}(t)$ の原子炉停止後の変化

原子炉出力の低下を定格運転のときの割合 R (%) で表わし、その期間 T とともに核種組成に及ぼす影響を調べる。

1) R = 75%, 燃焼度 30,000 MWD/MTU の場合

T = 1 日のときの結果を Fig. 8~12 に、T = 3 日および T = 7 日の結果をそれぞれ Fig. 13~17, Fig. 18~22 に示す。一般に、希ガスについては、Kr-85, Xe-131m, Xe-133, Xe-135m の比較的半減期の長い核種は組成率比 ($f_i(t)/f_{i_0}(t)$) は原子炉停止後数10時間にわたって1より大きく、その他の半減期の短い核種の組成率比は1より小さい。その

中で、Xe-135のそれは原子炉停止後数時間は1より大きくそれ以後は1より小さくなる。また、組成率比は時間とともに単調減少し、原子炉停止後500時間内では、半減期の長い核種は原子炉停止から時間が経過するにつれて1に近づく。ヨウ素についても希ガスと同様の傾向が認められ、I-129、I-131、I-132の比較的半減期の長い核種は組成率比は1より大きく、I-134、I-135、I-136については1より小さい。I-133は、Xe-135の場合と同様に原子炉停止後20時間は1より大きく、それ以後は1より小さくなる。Tの変化に対しては、半減期の長い核種(Kr-85、Xe-131m、I-129、I-131)の組成率比はTとともに大きくなり、事故直前の過渡変化を考慮しないで $f_{i_0}(t)$ の組成率を用いると過小評価の程度は著しくなる。逆に、半減期の短い核種は過大評価の程度が弱められる。しかし、全体的に $f_{i_0}(t)$ を用いるときの誤差は±20%以内に納まる。

ii) R=50%、燃焼度 30,000MWD/MTUの場合

T=1, 3, 7日の結果をそれぞれFig. 23~27, Fig. 28~32, Fig. 33~37に示す組成率比は、R=75%に比べて半減期の長い核種に対して大きくなり、短い核種に対しては小さくなる。すなわち、 $f_{i_0}(t)$ を用いるときの誤差はR=75%に比べて大きくなり、T=1日のときでXe-133では原子炉停止5時間後までは20%を超える。また、Xe-135では原子炉停止7時間以降で20%を超えた過大評価となる。ヨウ素については、I-131、I-132が原子炉停止10時間後までは20%を超える。Tの増加に対しては、Kr-85、Xe-131m、I-129、I-131の半減期の長い核種の組成率比は大きくなるが、Xe-133、Xe-133m、I-132といった比較的半減期の長い核種の組成率比は逆に小さくなり、 $f_{i_0}(t)$ を用いることの過小評価の程度も低減される。この傾向は、Rに関係なく認められる。

iii) R=25%、燃焼度 30,000MWD/MTU

T=1, 3, 7日の結果をそれぞれFig. 38~42, Fig. 43~47, Fig. 48~52に示す。 $f_{i_0}(t)$ を用いるときの誤差は、Xe-133の場合、原子炉停止10時間後までは20%を超える。Xe-135の場合、原子炉停止10時間以降で60%を超えた過大評価となる。ヨウ素については、I-131がT=1日のときで原子炉停止4時間後まで40%以上の過小評価となり、T=7日のときで原子炉停止30時間後まで40%以上過小評価されることになる。

iv) R=25%、燃焼度 10,000MWD/MTU

T=1日の結果をFig. 53~57に示す。燃焼度 30,000MWD/MTUの場合と比較して変化は小さく無視できる。Kr-85は、Fig.7で示したように燃焼度によってインベントリが著しく変化し、30,000MWD/MTUは10,000MWD/MTUの約3倍である。しかし、組成率比ではほとんど燃焼度による差は認められない。したがって、原子炉出力の過渡変化によるKr-85の組成率への影響は、燃焼度に関係なく原子炉出力の低下率とその期間にだけ関係する。

5. 考 察

前章の結果をまとめると次のようになる。

- ① 希ガスの組成は、原子炉停止10時間から400時間後まではXe-133とXe-135が90%以上を占める。
- ② ヨウ素の組成は、原子炉停止10時間後ではI-131, I-132, I-133の核種が主要な核種である。
- ③ 定格運転で原子炉停止に至るとしたときの組成率は、炉出力の過渡変化を考慮した場合に比べて、Kr-85, Xe-131m, Xe-133, Xe-133m, I-129, I-131, I-132で一般に過小評価となる。この傾向は、炉出力低下時間が長い程Kr-85, Xe-131m, I-129, I-131で一層著しくなるが、Xe-133, Xe-133m, I-132では逆に緩和される。
- ④ 原子炉出力の低下率の増加とともに、③で見られる傾向は著しくなる。
- ⑤ 燃焼度はKr-85の組成率にのみ大きく影響するが、他の核種の組成率または組成率比には影響しない。

以上の結果をもとに、SPEEDIで最終的に求められる被曝線量に及ぼす影響について考察する。大気中に拡散し広がった放射性雲からの γ 線照射線量率は、

$$D(x_0, y_0, z_0) = K \cdot \mu_{en} \cdot E \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} \cdot B(E, r) \cdot x(x, y, z) dx dy dz \quad (5.1)$$

で表わされる²⁾。したがって、照射線量率は放射性雲の広がり具合に関係なく光子エネルギーEとエネルギー吸収係数 μ_{en} に比例する。希ガス核種の $\mu_{en} \cdot E$ の値をTable 1に示す^{*}。ソースタームを加味すると、被曝線量は $f_{i_0}(t) \cdot \mu_{en} \cdot E$ に比例する。たとえば、R=25%、燃焼度30,000MWD/MTU、T=1日のとき、Xe-133とXe-135が主要核種となる原子炉停止10時間後では、 $f_{i_0}(t)$ を用いて線量評価すると、 $f_i(t)$ がXe-133で17%過小評価されるが、Xe-135が67%過大評価されるために、

$$\frac{D_t}{D_0} = \frac{\sum_i f_i(t) \cdot (\mu_{en} \cdot E)_i}{\sum_i f_{i_0}(t) \cdot (\mu_{en} \cdot E)_i} \quad (5.2)$$

ここで

D_t ; 原子炉出力の過渡変化を考慮したときの線量

D_0 ; 原子炉出力の過渡変化を考慮しないときの線量

*) E は実効光子エネルギー (MeV / dis) および μ_{en} は平均光子エネルギー (MeV / photon) のときの値を示す³⁾。

から、 D_0 は D_t を 24% 過大に評価することになる。また、 T が長くなると一般に $Xe-133$ 、 $Xe-135$ とともに誤差は軽減される傾向にあるので D_0 の誤差も緩和され、上の例で $T = 7$ 日のときで 16% の過大評価となる。原子炉停止後数時間以内では $Xe-133$ も $Xe-135$ も組成率は過小評価になるが、他の半減期の短い核種が過大評価されしかもそれらの $\mu_{en} \cdot E$ の値が比較的大きいため、実際には $R = 25\%$ 、燃焼度 30,000 MWD/MTU、 $T = 1$ 日で原子炉停止 1 時間後の場合で、 D_0 は約 90% の過大評価になる。

以上のことから、 D_0 は D_t を一般に過大評価しその程度は、原子炉出力の低下率が増加する程大きいとその低下期間が長い程緩和される。また、原子炉停止からの時間が短い程過大評価の程度は大きいと時間の経過とともに軽減される。

次にヨウ素の吸入による甲状腺被曝に及ぼす影響について考察する。 $I-131$ はヨウ素組成の中心をなししかも線量換算係数 (Sv/Bq) が大きい上に、一般に $I-131$ の組成率が過小評価されるから、炉出力の過渡変化を考慮しないと甲状腺線量は過小評価されてしまう。例えば、 $R = 25\%$ 、燃焼度 30,000 MWD/MTU、原子炉停止 10 時間後の場合、 $T = 1$ 日で約 20%、 $T = 7$ 日で約 30% 過小評価されることになる。この傾向は、原子炉出力の低下率が大きい程、またその期間が長い程著しい。

6. 結 論

SPEED1 のソースターム計算に用いる希ガスまたはヨウ素の核種組成は線量評価上有用な情報となる。原子炉事故は一般に事故に至る直前において炉出力の変化を伴うことが多い。希ガスおよびヨウ素の核種の中には半減期が数日以下の短いものが多く、これらの核種の炉内インベントリは原子炉停止前の運転履歴に強く依存する。したがって、定格運転から原子炉停止に至ると仮定した場合の核種組成率は、原子炉停止前の運転履歴によって核種の半減期の比較的最長いものでは過小評価となる。この程度は、炉出力低下率およびその期間、または原子炉停止からの時間によって幾分異なる。線量評価の観点からは、希ガスからの体外被曝の場合、定格運転から原子炉停止に至ると仮定したときの核種組成を用いると全体として過大評価となる。その程度は、原子炉停止 10 時間後ではせいぜい 20% であるが、原子炉停止 1 時間後では 90% 近くにも達する。しかし、ヨウ素の甲状腺被曝の場合は逆に過小評価となる。その程度は、原子炉停止 10 時間後で高々 30% である。

以上のように、定格運転から原子炉停止に至ると仮定した場合の核種組成を線量評価に用いることの誤差は、原子力施設からの放出率の推定や大気拡散による放射性物質の濃度の評価に伴う誤差から判断すると結果に及ぼす影響はそれ程大きくない。しかしながら、事故前の原子炉運転履歴が事故時に迅速に入手可能であるならば、それを入力データとして原子炉停止後の炉内インベントリを算定する計算コードが整備されてきている⁶⁾ので、運転履歴を加味したより精度の高い核種組成を線量計算に用いることが望ましい。

から、 D_0 は D_t を 24% 過大に評価することになる。また、 T が長くなると一般に $Xe-133$ 、 $Xe-135$ とともに誤差は軽減される傾向にあるので D_0 の誤差も緩和され、上の例で $T=7$ 日のときで 16% の過大評価となる。原子炉停止後数時間以内では $Xe-133$ も $Xe-135$ も組成率は過小評価になるが、他の半減期の短い核種が過大評価されしかもそれらの $\mu_{en} \cdot E$ の値が比較的大きいため、実際には $R=25\%$ 、燃焼度 30,000 MWD/MTU、 $T=1$ 日で原子炉停止 1 時間後の場合で、 D_0 は約 90% の過大評価になる。

以上のことから、 D_0 は D_t を一般に過大評価しその程度は、原子炉出力の低下率が増加する程大きいとその低下期間が長い程緩和される。また、原子炉停止からの時間が短い程過大評価の程度は大きいと時間の経過とともに軽減される。

次にヨウ素の吸入による甲状腺被曝に及ぼす影響について考察する。 $I-131$ はヨウ素組成の中心をなししかも線量換算係数 (Sv/Bq) が大きい上に、一般に $I-131$ の組成率が過小評価されるから、炉出力の過渡変化を考慮しないと甲状腺線量は過小評価されてしまう。例えば、 $R=25\%$ 、燃焼度 30,000 MWD/MTU、原子炉停止 10 時間後の場合、 $T=1$ 日で約 20%、 $T=7$ 日で約 30% 過小評価されることになる。この傾向は、原子炉出力の低下率が大きい程、またその期間が長い程著しい。

6. 結 論

SPEEDI のソースターム計算に用いる希ガスまたはヨウ素の核種組成は線量評価上有用な情報となる。原子炉事故は一般に事故に至る直前において炉出力の変化を伴うことが多い。希ガスおよびヨウ素の核種の中には半減期が数日以下の短いものが多く、これらの核種の炉内インベントリは原子炉停止前の運転履歴に強く依存する。したがって、定格運転から原子炉停止に至ると仮定した場合の核種組成率は、原子炉停止前の運転履歴によって核種の半減期の比較的最長いものでは過小評価となる。この程度は、炉出力低下率およびその期間、または原子炉停止からの時間によって幾分異なる。線量評価の観点からは、希ガスからの体外被曝の場合、定格運転から原子炉停止に至ると仮定したときの核種組成を用いると全体として過大評価となる。その程度は、原子炉停止 10 時間後ではせいぜい 20% であるが、原子炉停止 1 時間後では 90% 近くにも達する。しかし、ヨウ素の甲状腺被曝の場合は逆に過小評価となる。その程度は、原子炉停止 10 時間後で高々 30% である。

以上のように、定格運転から原子炉停止に至ると仮定した場合の核種組成を線量評価に用いることの誤差は、原子力施設からの放出率の推定や大気拡散による放射性物質の濃度の評価に伴う誤差から判断すると結果に及ぼす影響はそれ程大きくない。しかしながら、事故前の原子炉運転履歴が事故時に迅速に入手可能であるならば、それを入力データとして原子炉停止後の炉内インベントリを算定する計算コードが整備されてきている⁶⁾ので、運転履歴を加味したより精度の高い核種組成を線量計算に用いることが望ましい。

謝 辞

本報告書の作成に際し御指導賜わった環境安全研究部今井和彦部長と、安全解析部核燃料施設安全解析室長内藤俣孝氏に感謝します。計算コードNICCAの改良・実行には公開コード保守整備費を用い、原子力データセンターの助力を得たことを記し、ここに感謝します。

参 考 文 献

- 1) 茅野政道他；SPEEDI：緊急時環境線量情報予測システム，JAERI-M 84-050（1984）
- 2) 甲斐倫明；任意の濃度分布をもつ放射性雲からの外部被曝線量計算コード（CIDE），JAERI-M 84-006（1984）
- 3) 日高昭秀，甲斐倫明；放射性雲からの γ 線体外被曝線量評価に用いる核種の実効エネルギーと平均エネルギーの妥当性について，日本保健物理学会第20回研究発表会要旨集，（1985）
- 4) Bell, M. J. ; ORIGEN: The ORNL isotope generation and depletion code, ORNL-TM-7175 (1980)
- 5) Croff, A. G. ; A user's manual for the ORIGEN2 computer code, ORNL-TM-7175 (1980)
- 6) 大久保収二，内藤俣孝，原俊治；事故時炉内核種インベントリ計算コードNICCAの作成，昭和59年日本原子力学会秋の分科会要旨集（1984）

謝 辞

本報告書の作成に際し御指導賜わった環境安全研究部今井和彦部長と、安全解析部核燃料施設安全解析室長内藤倣孝氏に感謝します。計算コードNICCAの改良・実行には公開コード保守整備費を用い、原子力データセンターの助力を得たことを記し、ここに感謝します。

参 考 文 献

- 1) 茅野政道他；SPEEDI：緊急時環境線量情報予測システム，JAERI-M 84-050
(1984)
- 2) 甲斐倫明；任意の濃度分布をもつ放射性雲からの外部被曝線量計算コード(CIDE)，
JAERI-M 84-006 (1984)
- 3) 口高昭秀，甲斐倫明；放射性雲からの γ 線体外被曝線量評価に用いる核種の実効エネルギーと平均エネルギーの妥当性について，日本保健物理学会第20回研究発表会要旨集，
(1985)
- 4) Bell, M. J. ; ORIGEN: The ORNL isotope generation and depletion code, ORNL-TM-7175 (1980)
- 5) Croff, A. G. ; A user's manual for the ORIGEN2 computer code, ORNL-TM-7175 (1980)
- 6) 大久保収二，内藤倣孝，原俊治；事故時炉内核種インベントリー計算コードNICCAの作成，昭和59年日本原子力学会秋の分科会要旨集(1984)

Table 1 Characteristics of dose contribution in noble nuclides

nuclide	half-life	Eeff [*])	Eav ^{**})	Eeff μ_{en} (Eav) ^{***)}
⁸⁸ Kr	2.8 h	1.95	1.35	6.1×10^{-3}
⁸⁹ Kr	3.2 m	1.83	1.12	6.0×10^{-3}
⁹⁰ Kr	34 s	1.29	0.753	4.5×10^{-3}
¹³⁸ Xe	17 m	1.13	0.848	3.8×10^{-3}
¹³⁹ Xe	42 s	0.92	0.554	3.3×10^{-3}
⁸⁷ Kr	76 m	0.792	0.958	2.7×10^{-3}
^{135m} Xe	15.6 m	0.428	0.51	1.5×10^{-3}
¹³⁵ Xe	9.2 h	0.249	0.249	8.2×10^{-4}
¹³⁷ Xe	3.8 m	0.183	0.54	6.6×10^{-4}
^{85m} Kr	4.5 h	0.157	0.156	4.9×10^{-4}
^{131m} Xe	12 d	0.0197	0.0316	3.4×10^{-4}
¹³³ Xe	5.3 d	0.0398	0.0568	1.6×10^{-4}
^{133m} Xe	2.3 d	0.0397	0.0592	1.4×10^{-4}
⁸⁵ Kr	10.8 y	0.0022	0.52	1.1×10^{-5}

*) effective photon energy (MeV/dis.)

***) average photon energy (MeV/photon)

****) energy absorption coefficient as a function of energy (m^{-1})

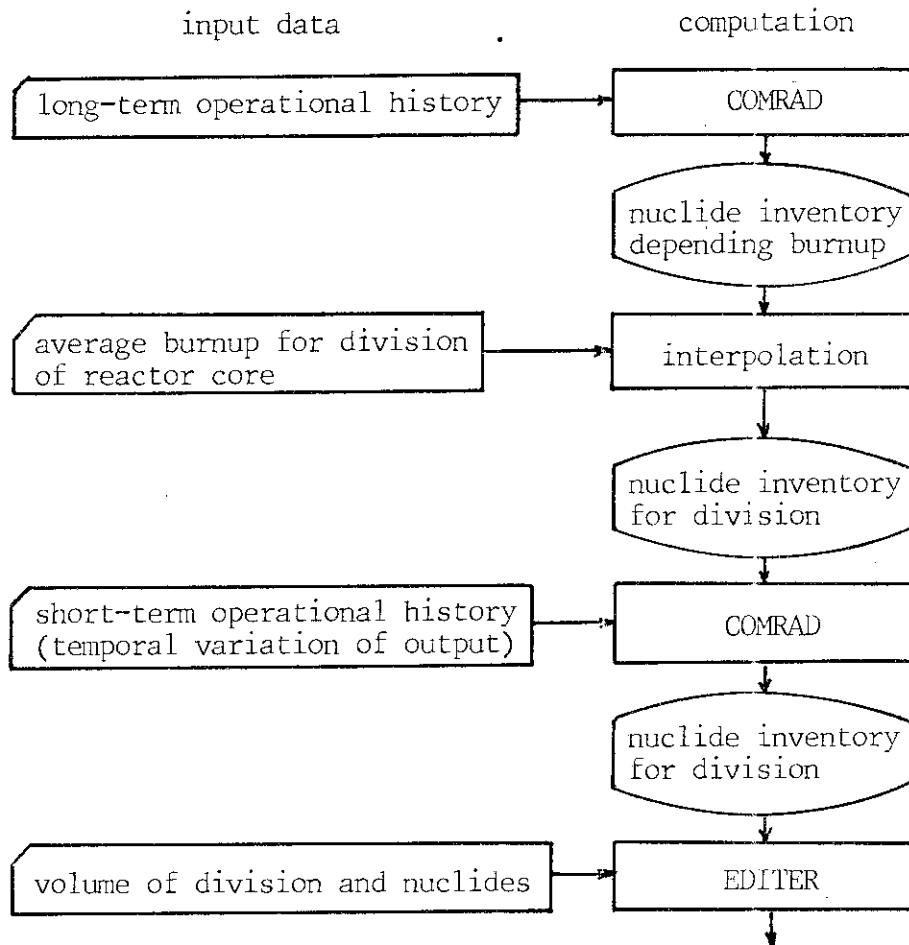


Fig. 1 Calculational flow of NICCA code for calculating nuclide inventory depending on variation of reactor output before its shutdown.

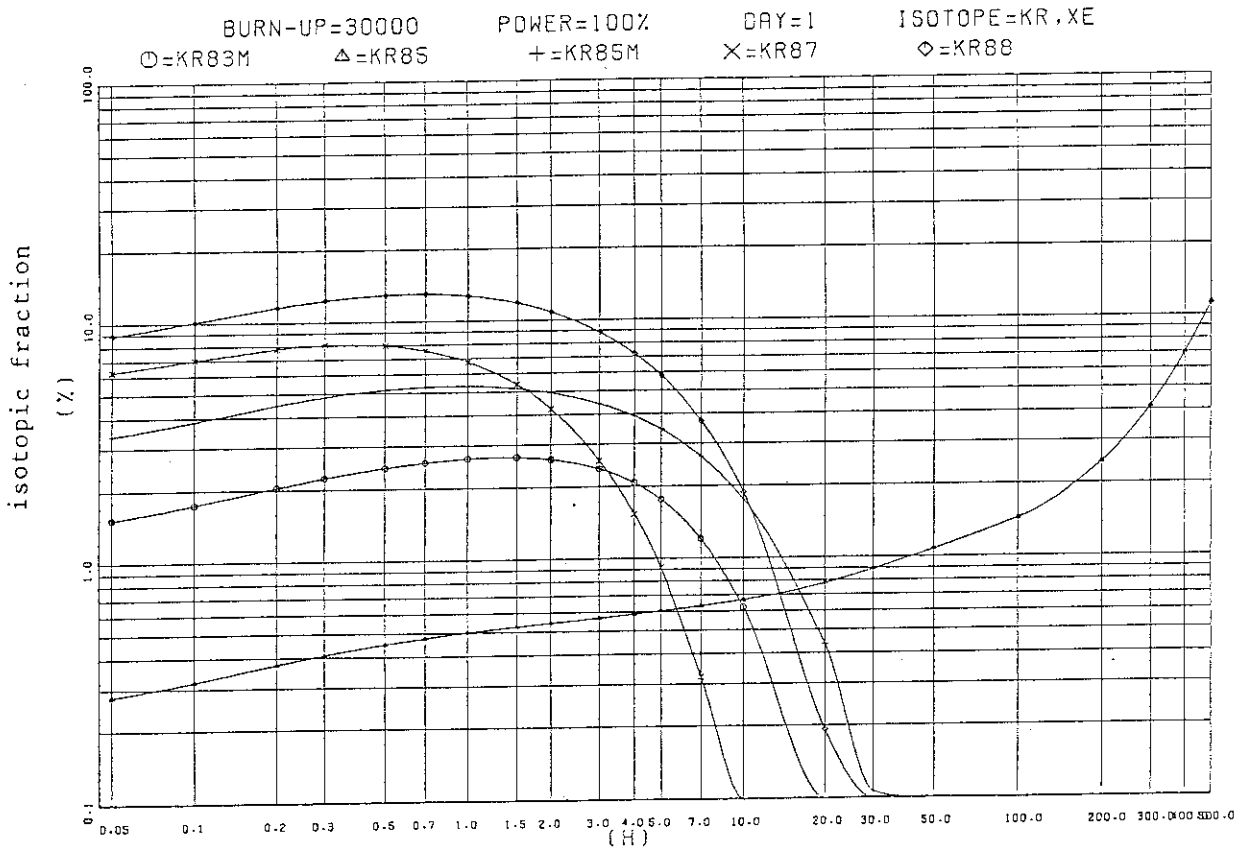


Fig. 2 Evolution of isotopic composition following reactor shutdown immediately after its rated output operation.

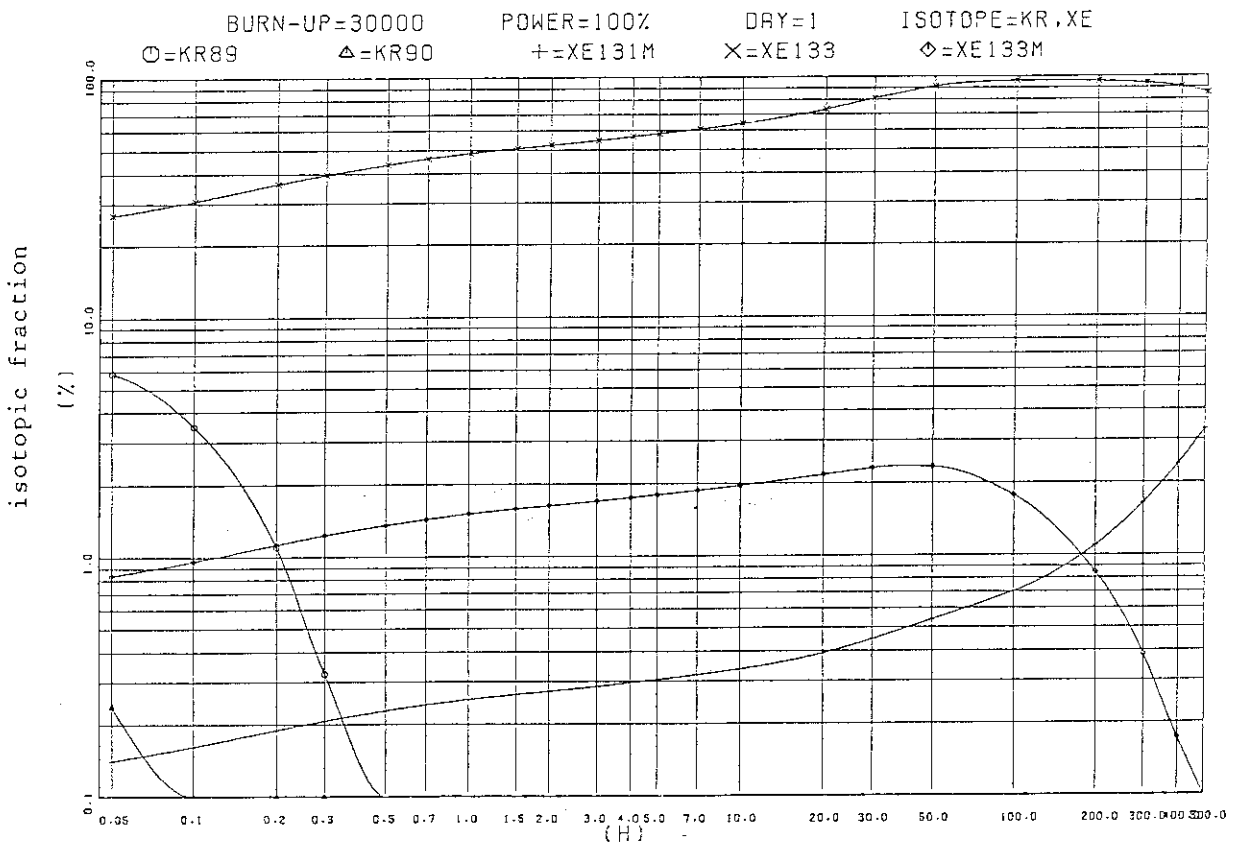


Fig. 3 Evolution of isotopic composition following reactor shutdown immediately after its rated output operation.

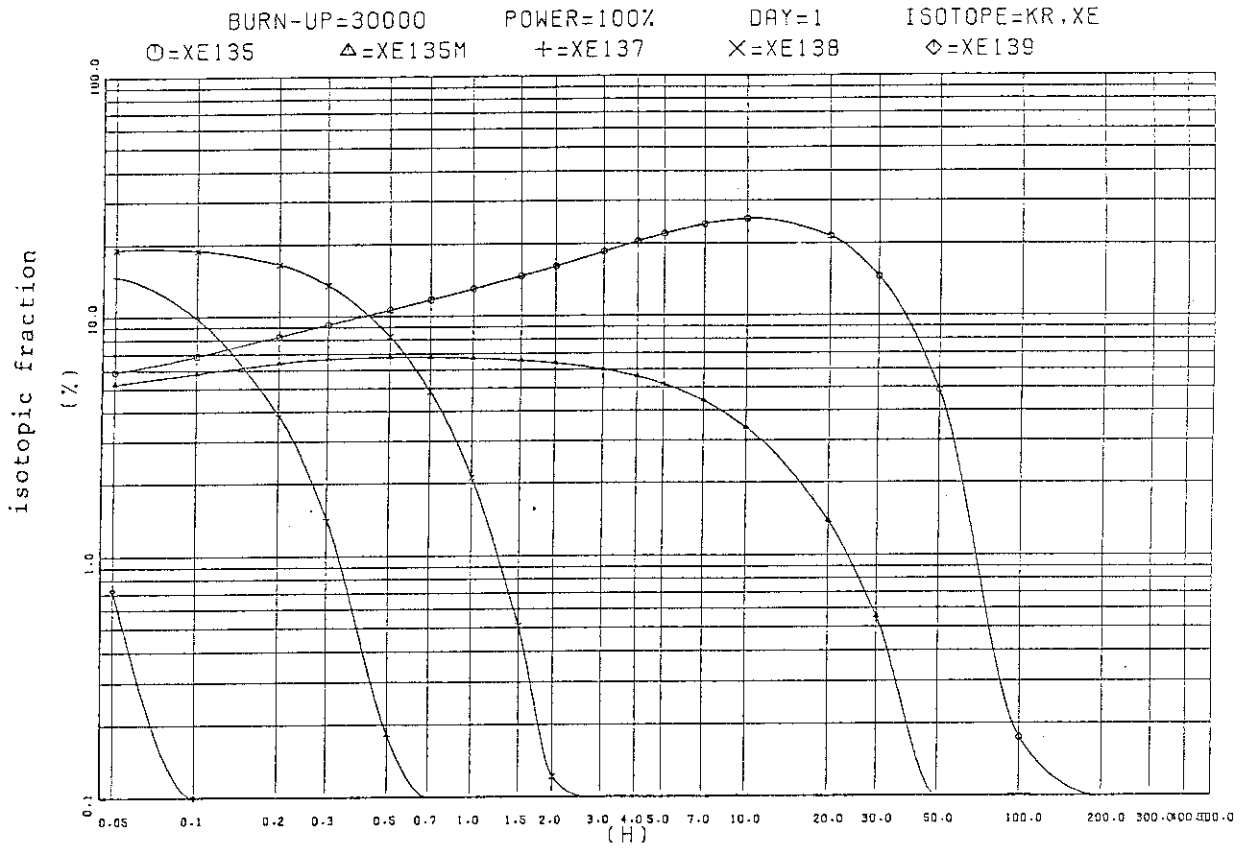


Fig. 4 Evolution of isotopic composition following reactor shutdown immediately after its rated output operation.

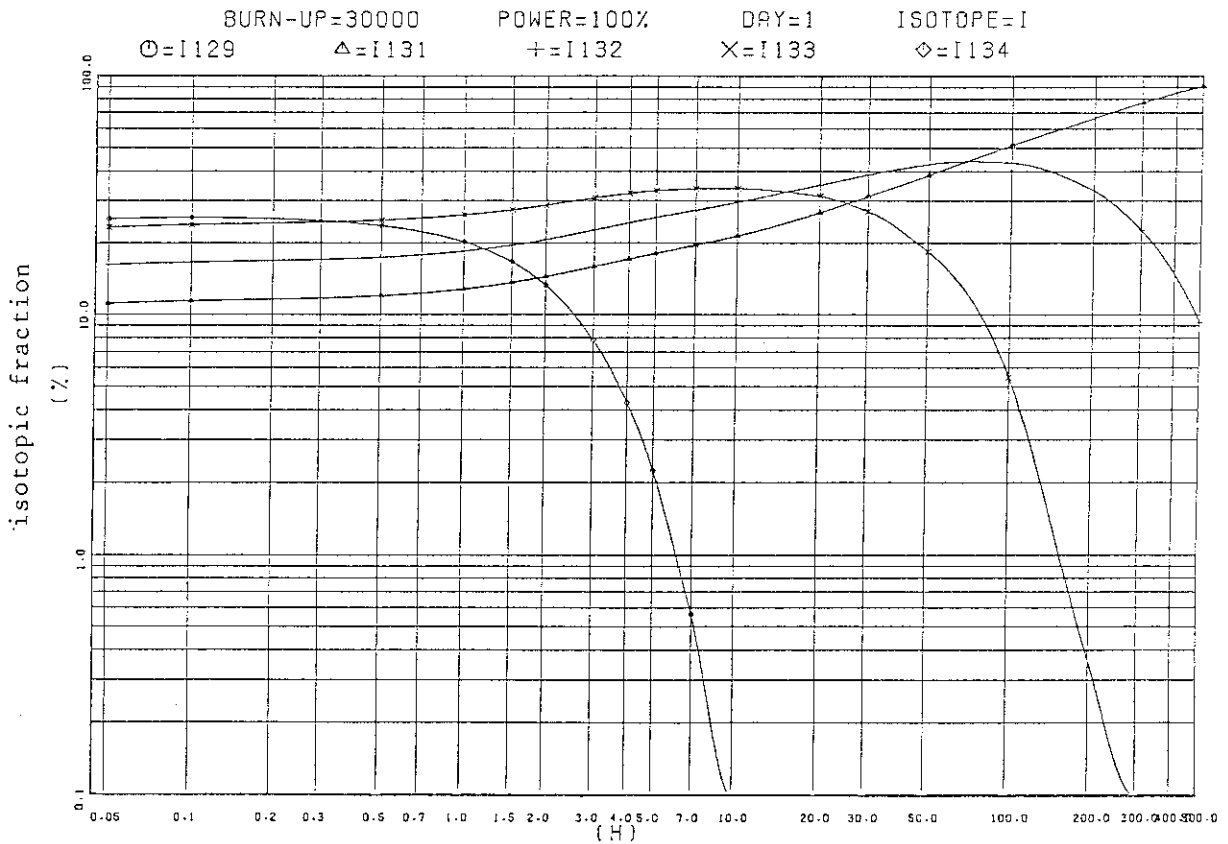


Fig. 5 Evolution of isotopic composition following reactor shutdown immediately after its rated output operation.

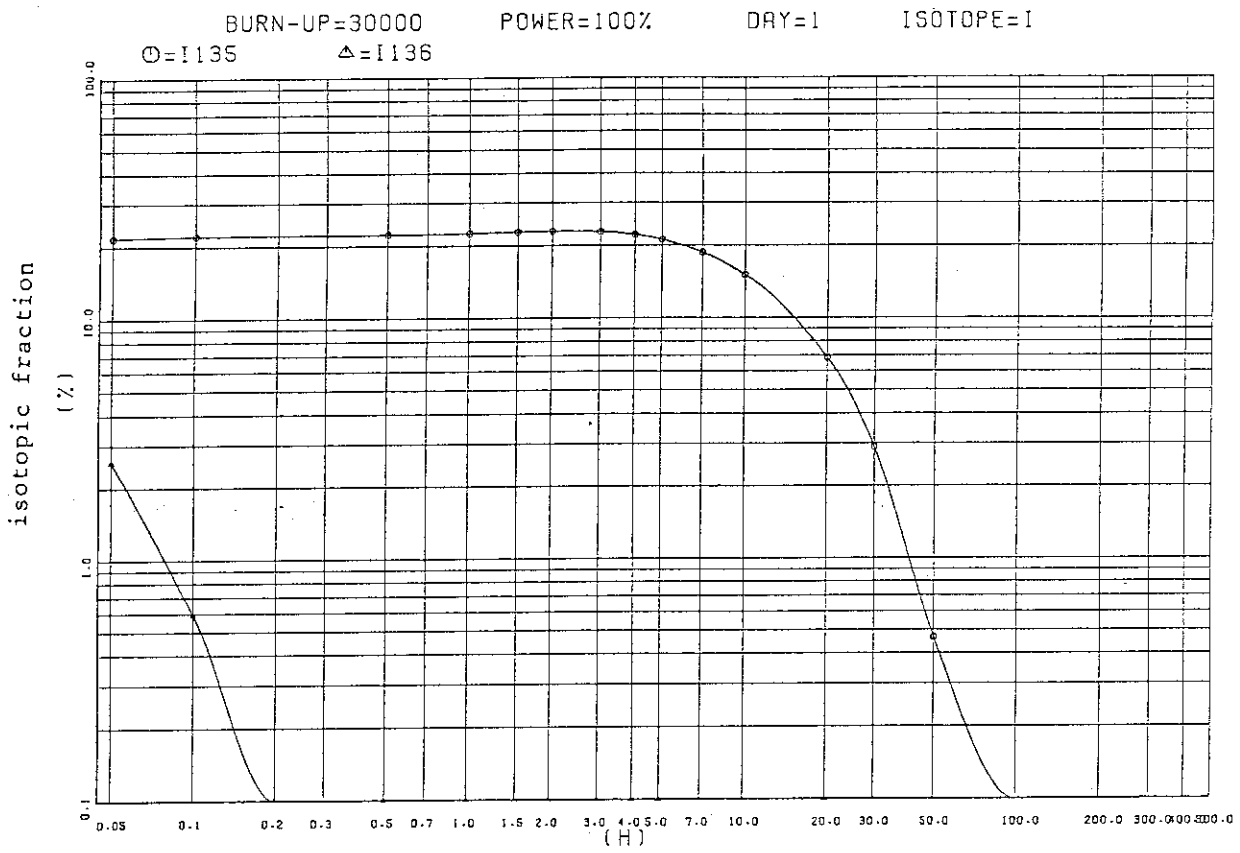


Fig. 6 Evolution of isotopic composition following reactor shutdown immediately after its rated output operation.

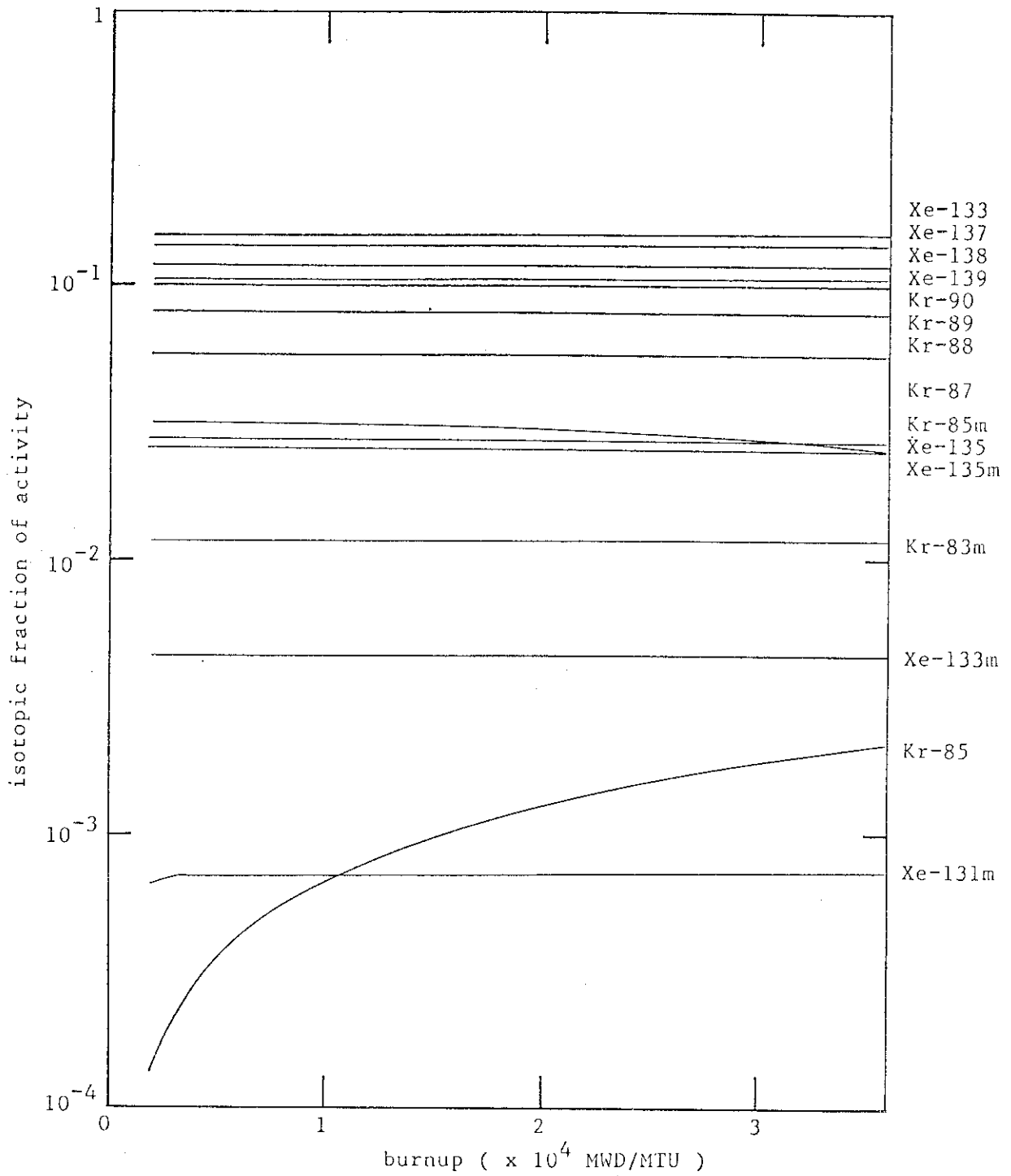


Fig. 7 Isotopic composition of noble nuclides depending on burnup.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR83M △=KR85 +=KR85M ×=KR87 ◇=KR88

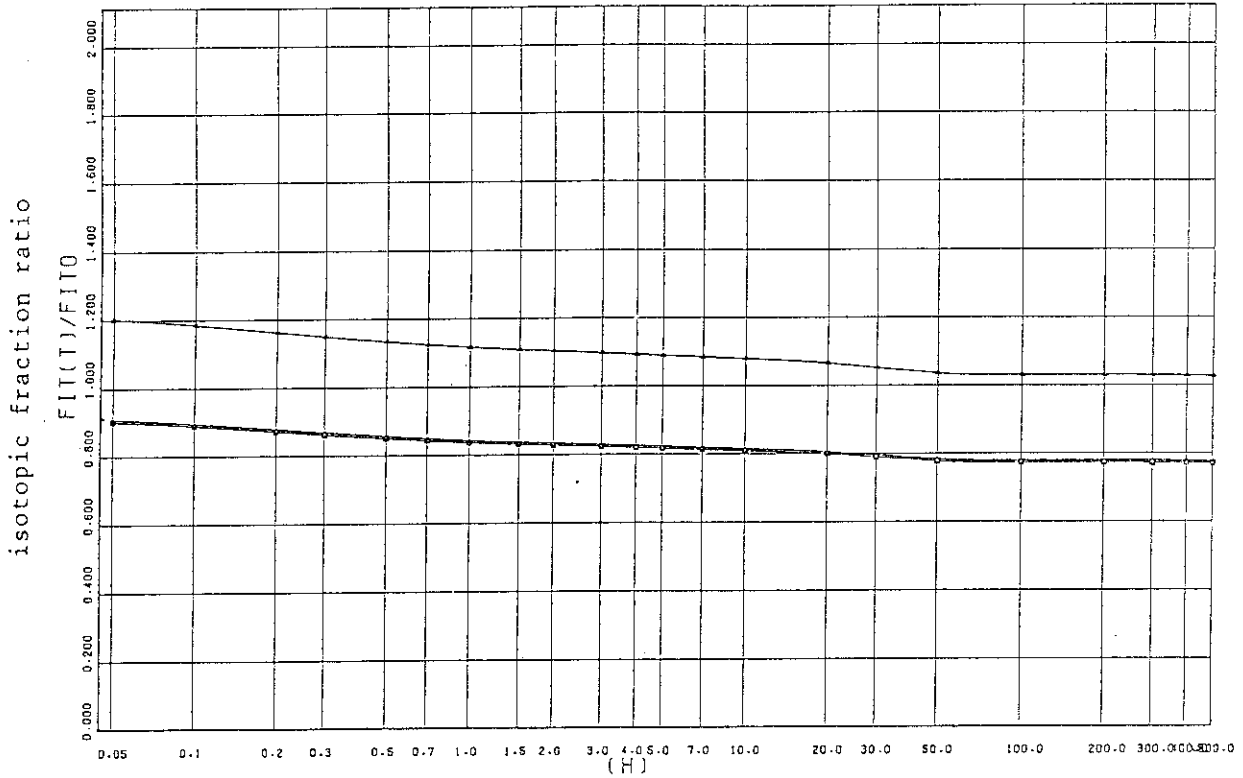


Fig. 8 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 +=XE131M ×=XE133 ◇=XE133M

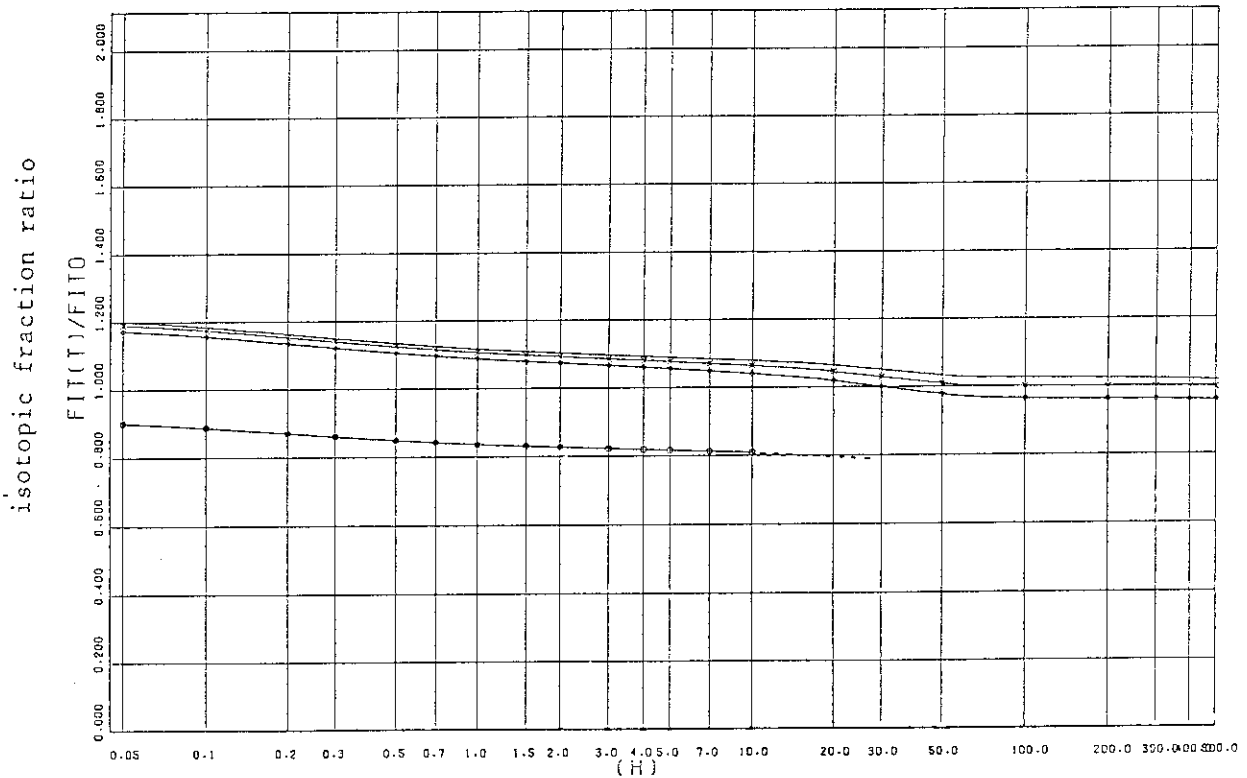


Fig. 9 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

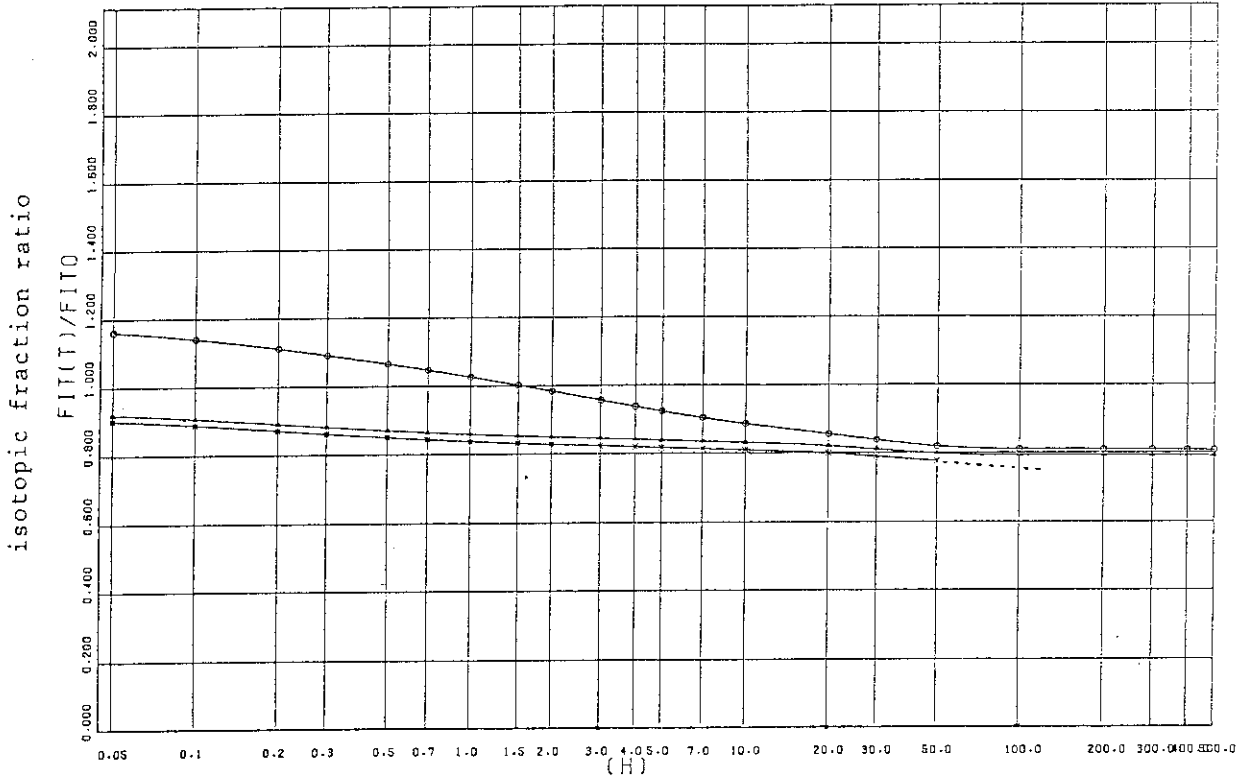


Fig. 10 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

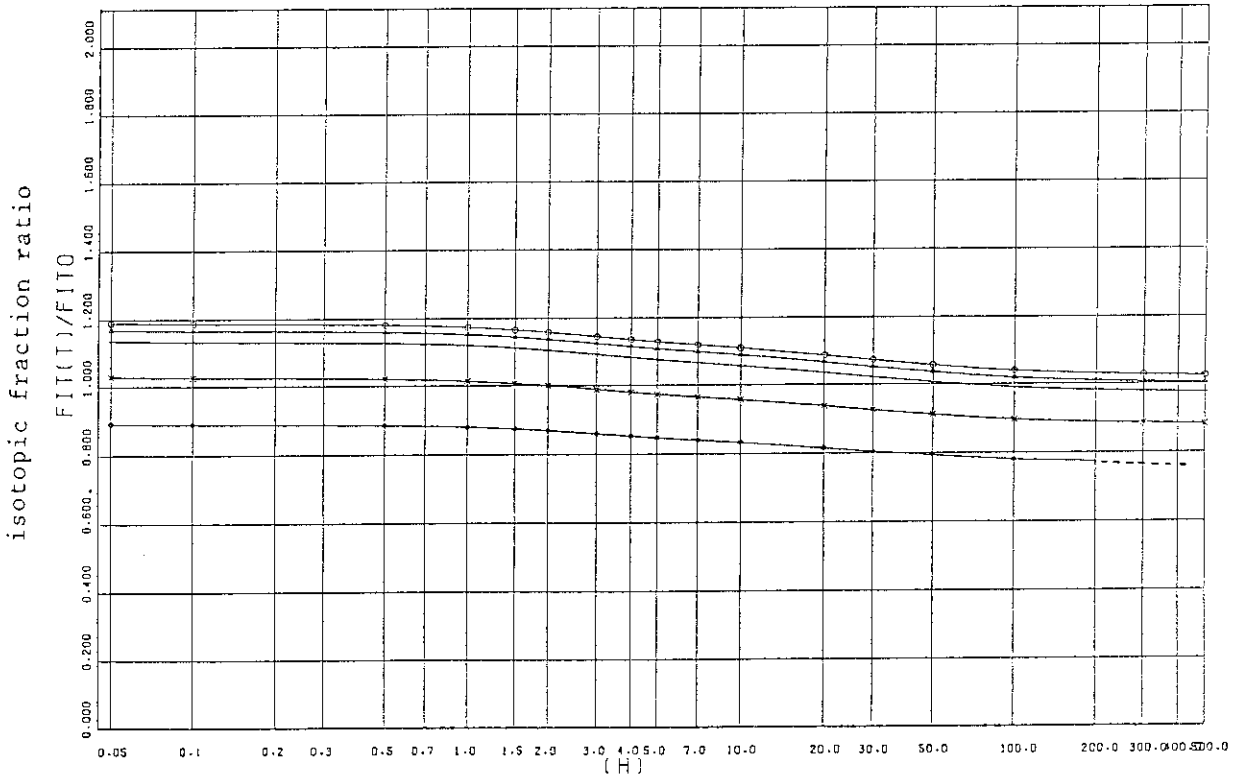


Fig. 11 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000
 O=I135 Δ=I136

POWER=75%

DAY=1

ISOTOPE=I

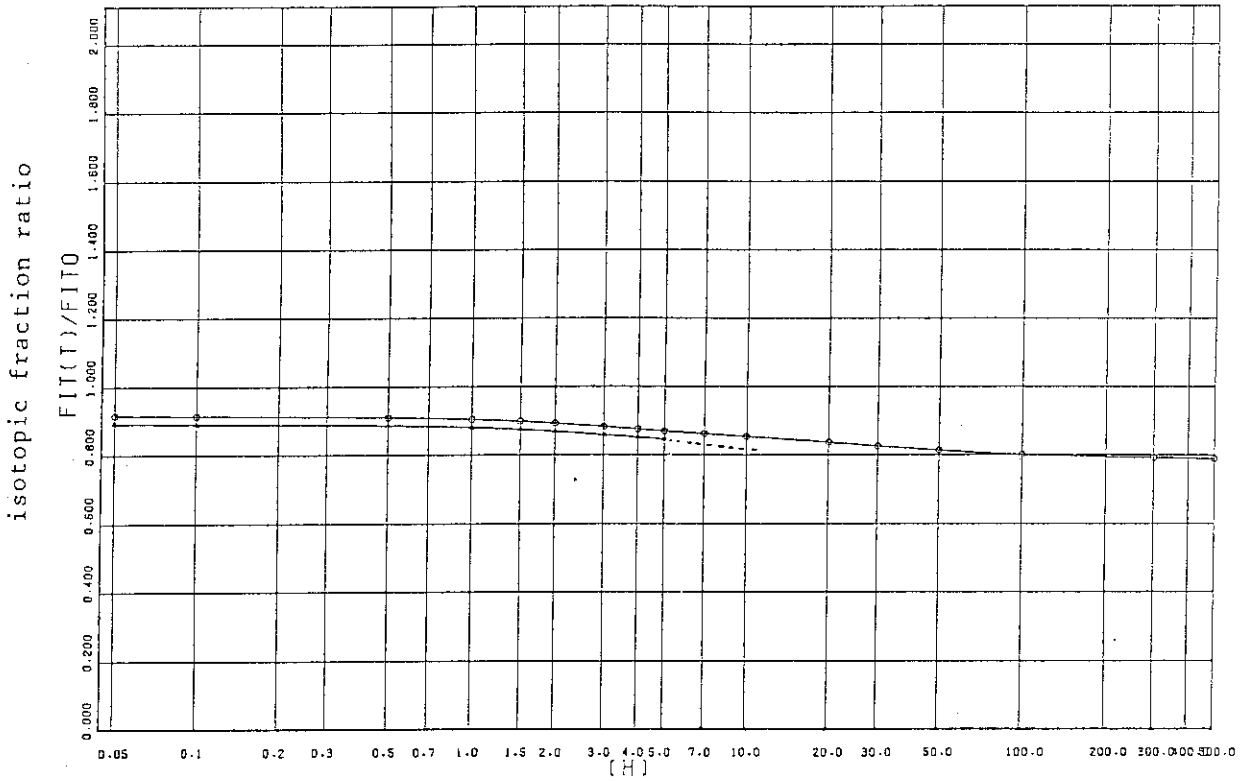


Fig. 12 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=3 ISOTOPE=KR,XE
 O=KR83M Δ=KR85 +=KR85M X=KR87 ◇=KR88

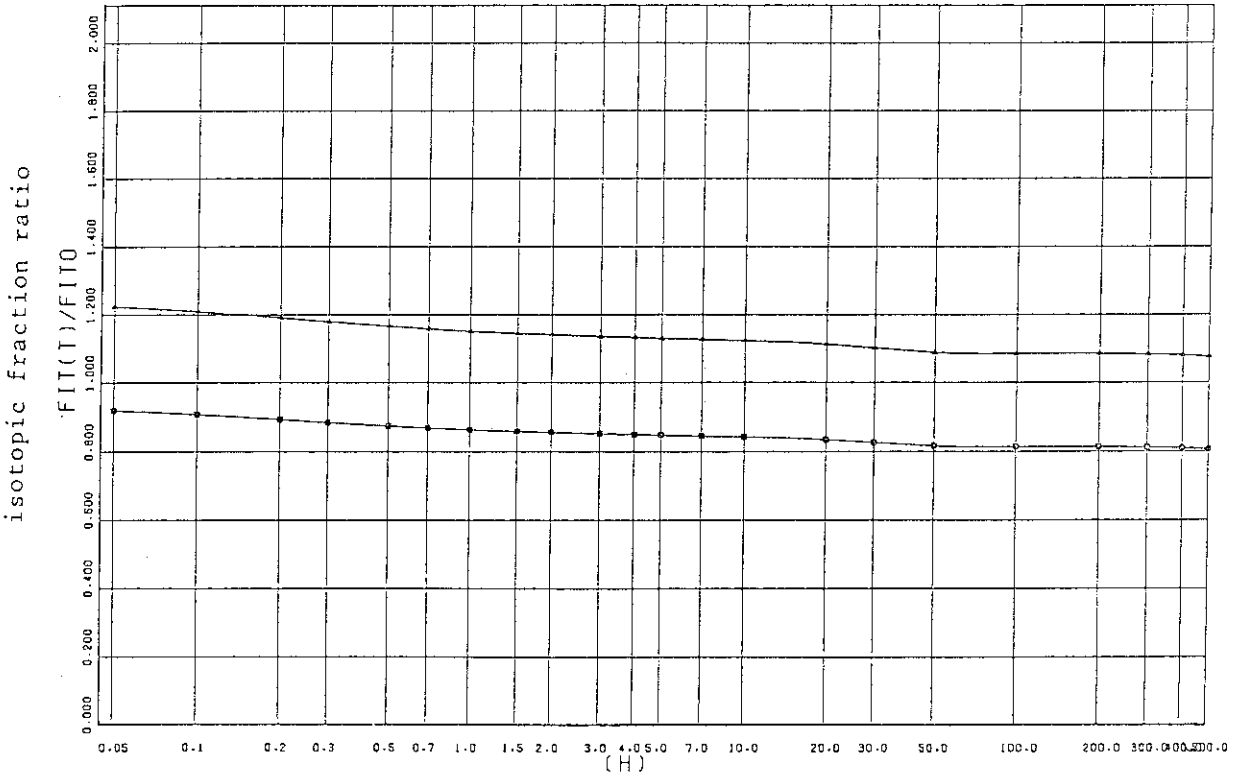


Fig. 13 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=3 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 + =XE131M X=XE133 ◇=XE133M

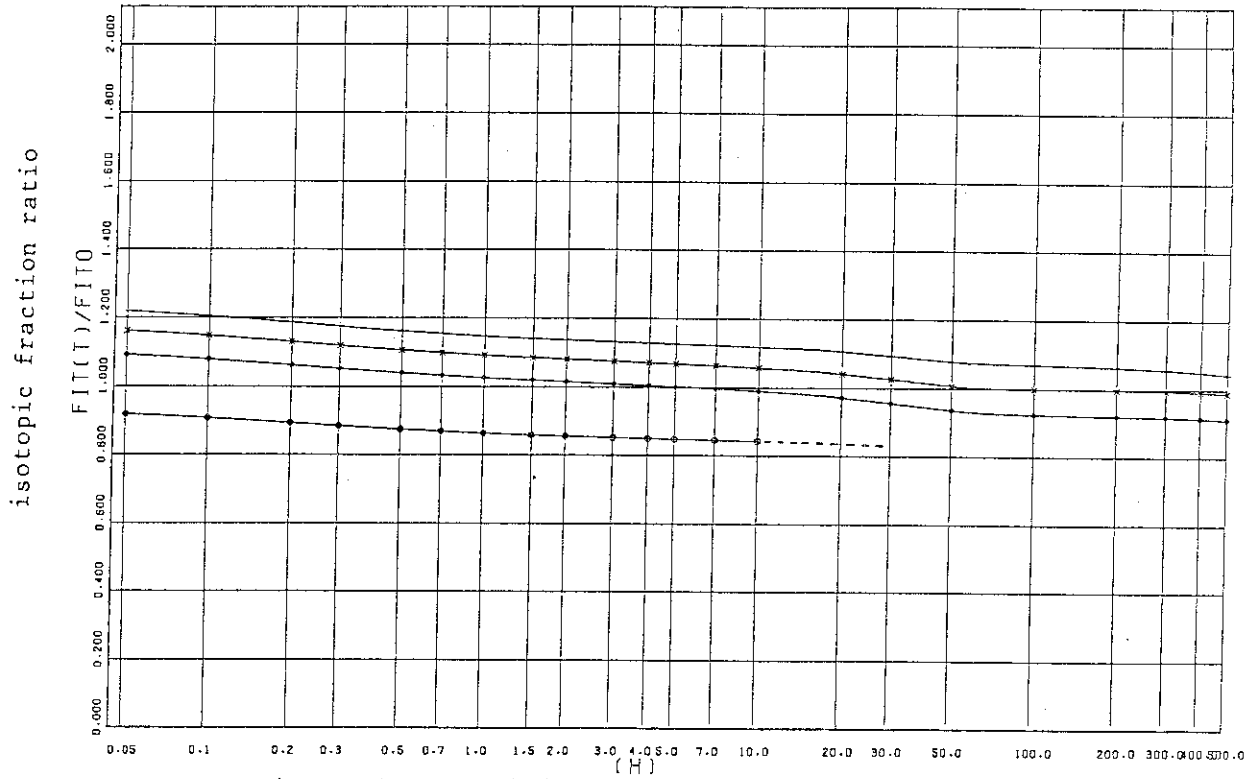


Fig. 14 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=3 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M + =XE137 X=XE138 ◇=XE139

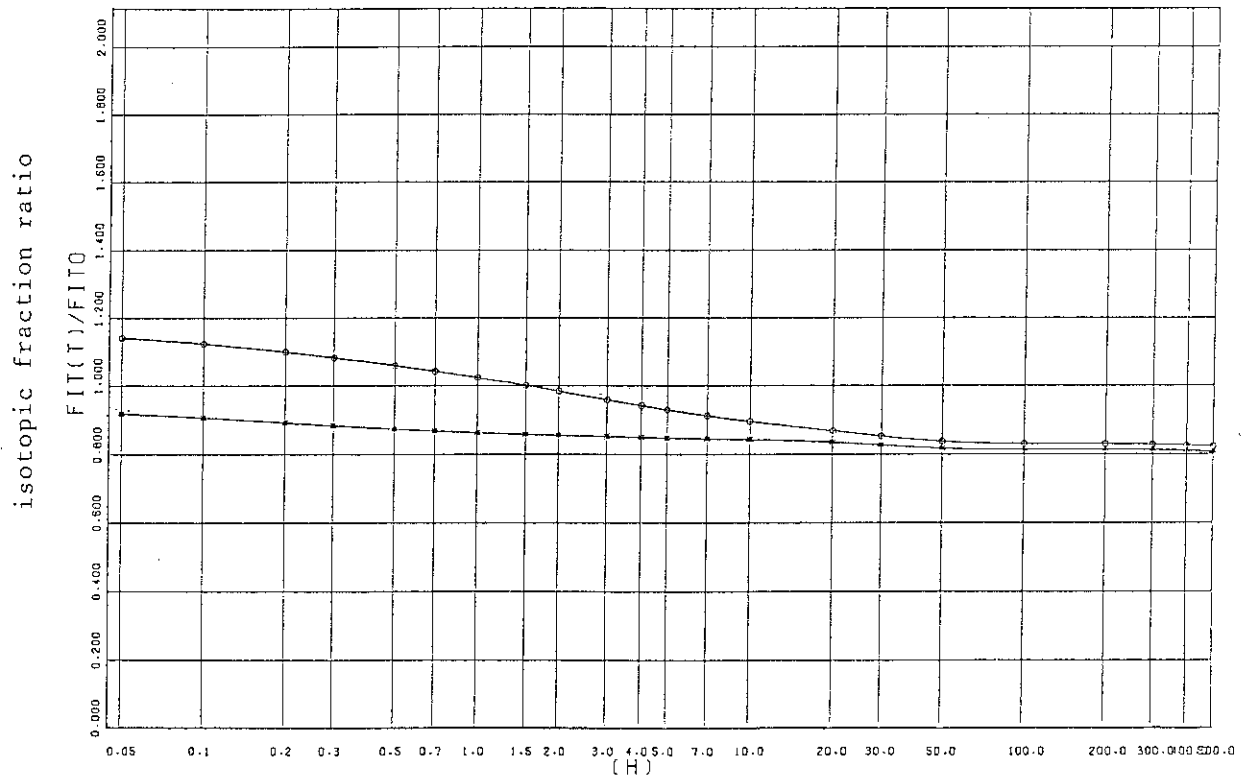


Fig. 15 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=3 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

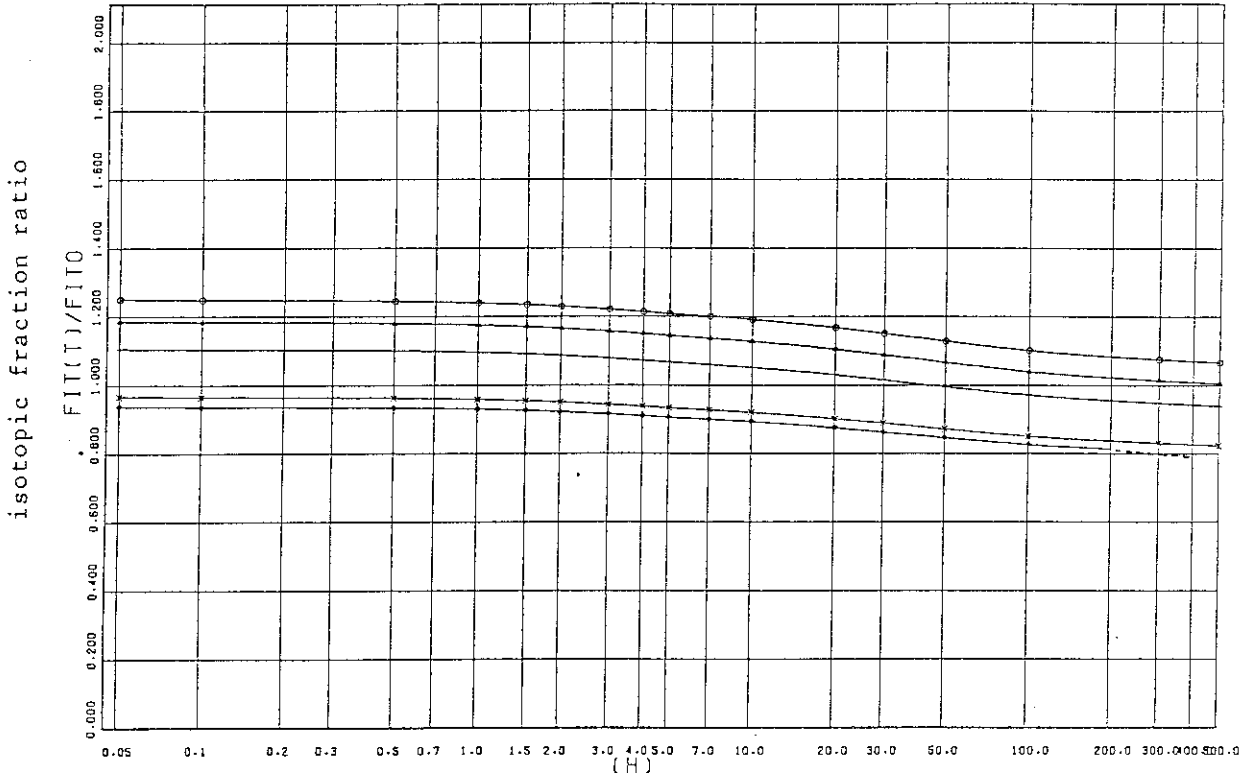


Fig. 16 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=3 ISOTOPE=I
 ○=I135 △=I136

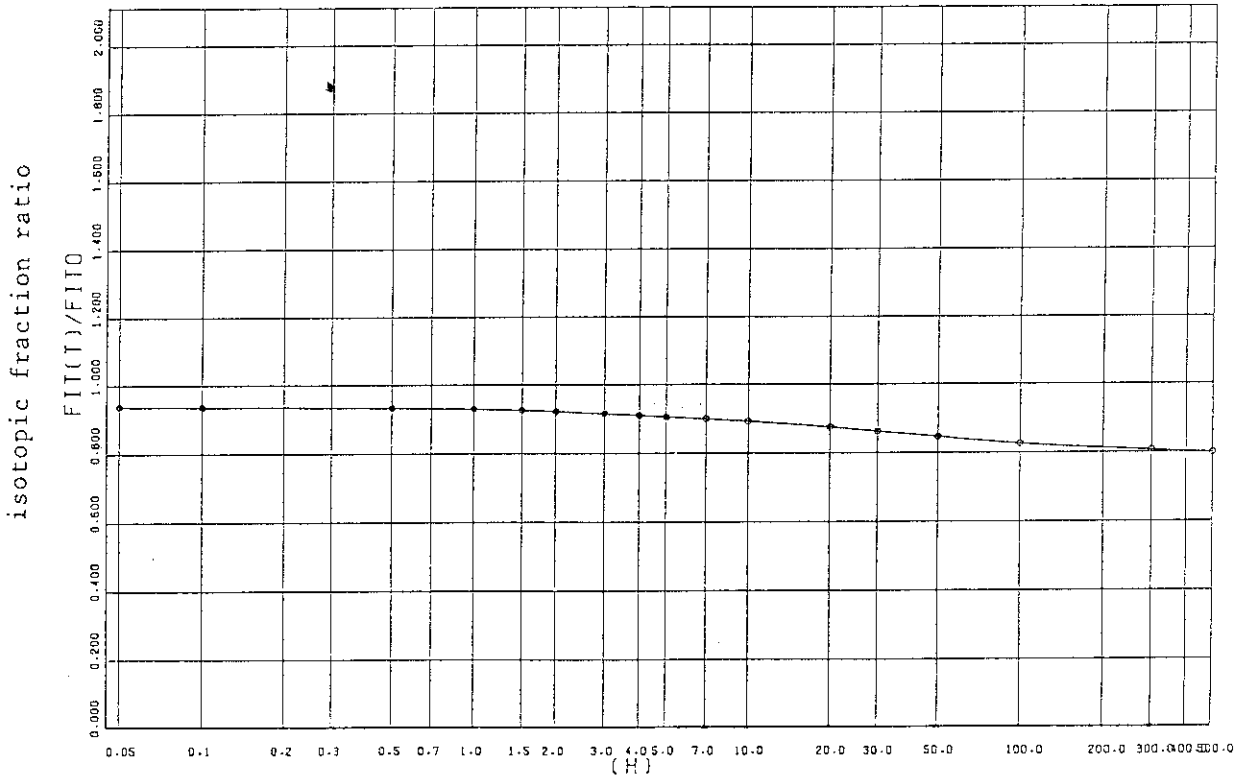


Fig. 17 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR83M △=KR85 + =KR85M ×=KR87 ◇=KR88

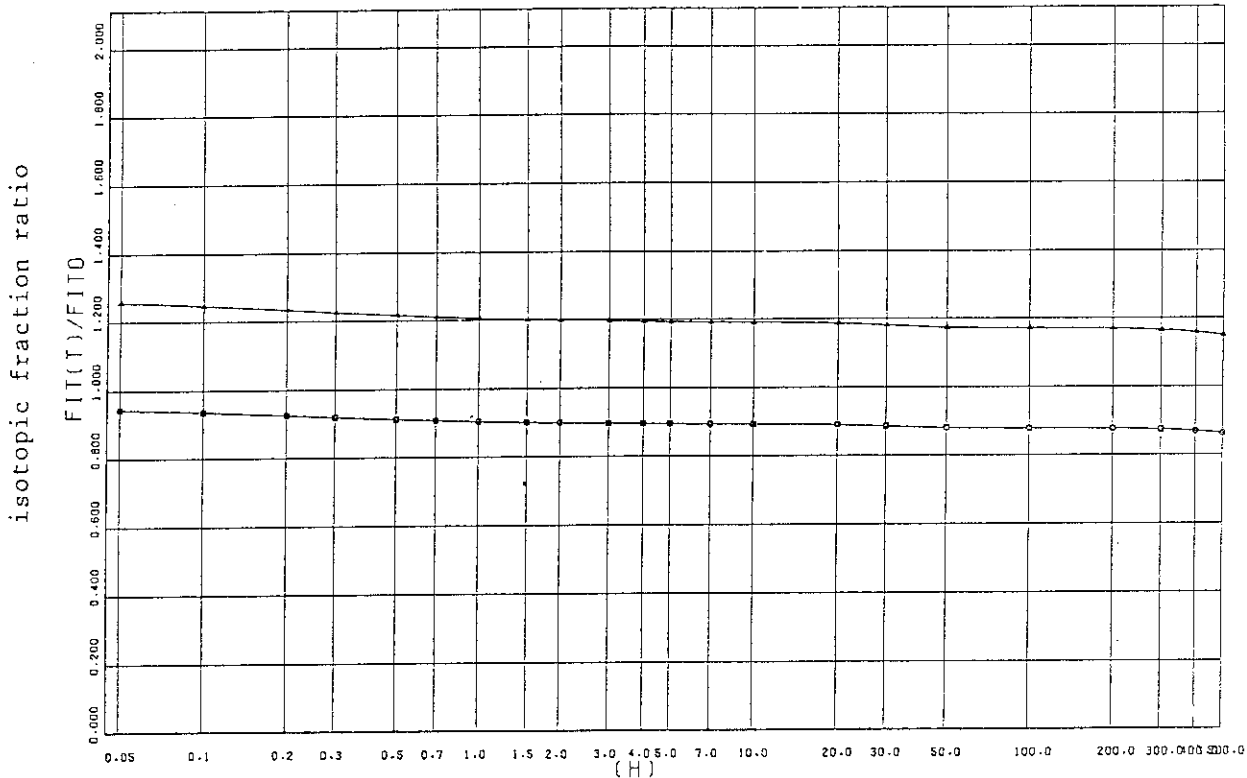


Fig. 18 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 + =XE131M ×=XE133 ◇=XE133M

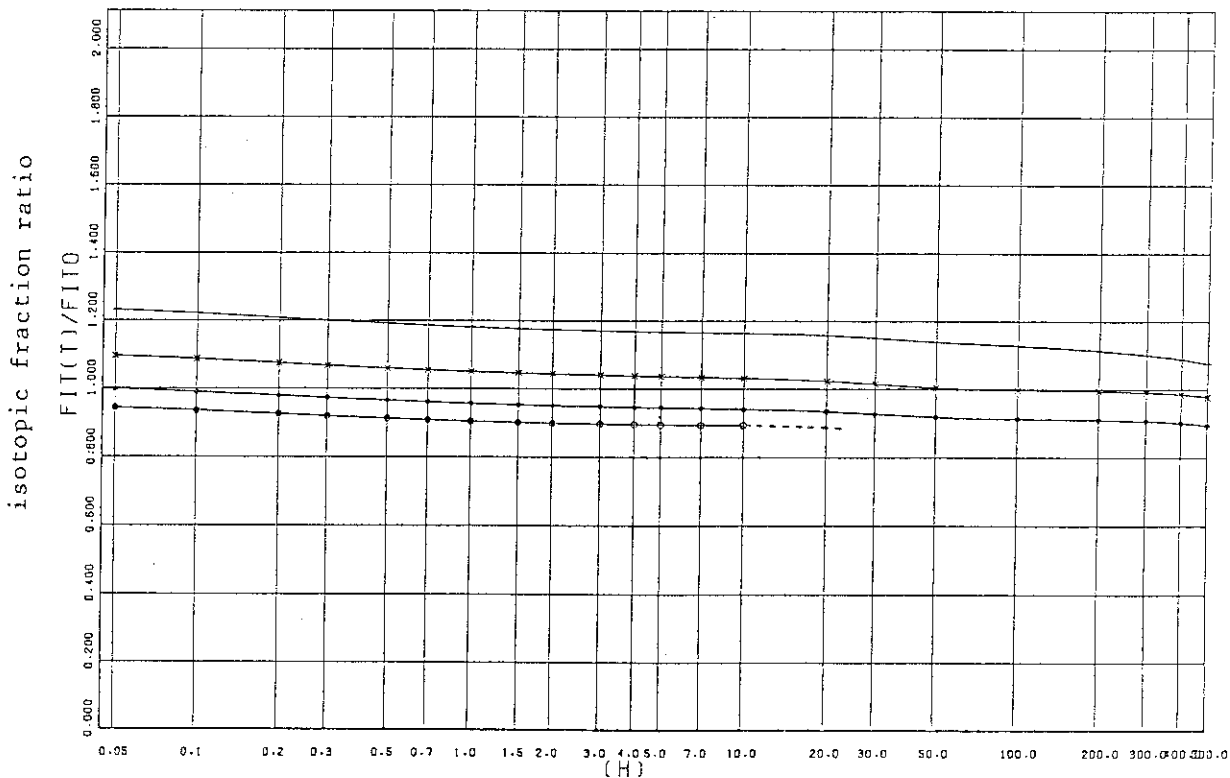


Fig. 19 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 ×=XE138 ◇=XE139

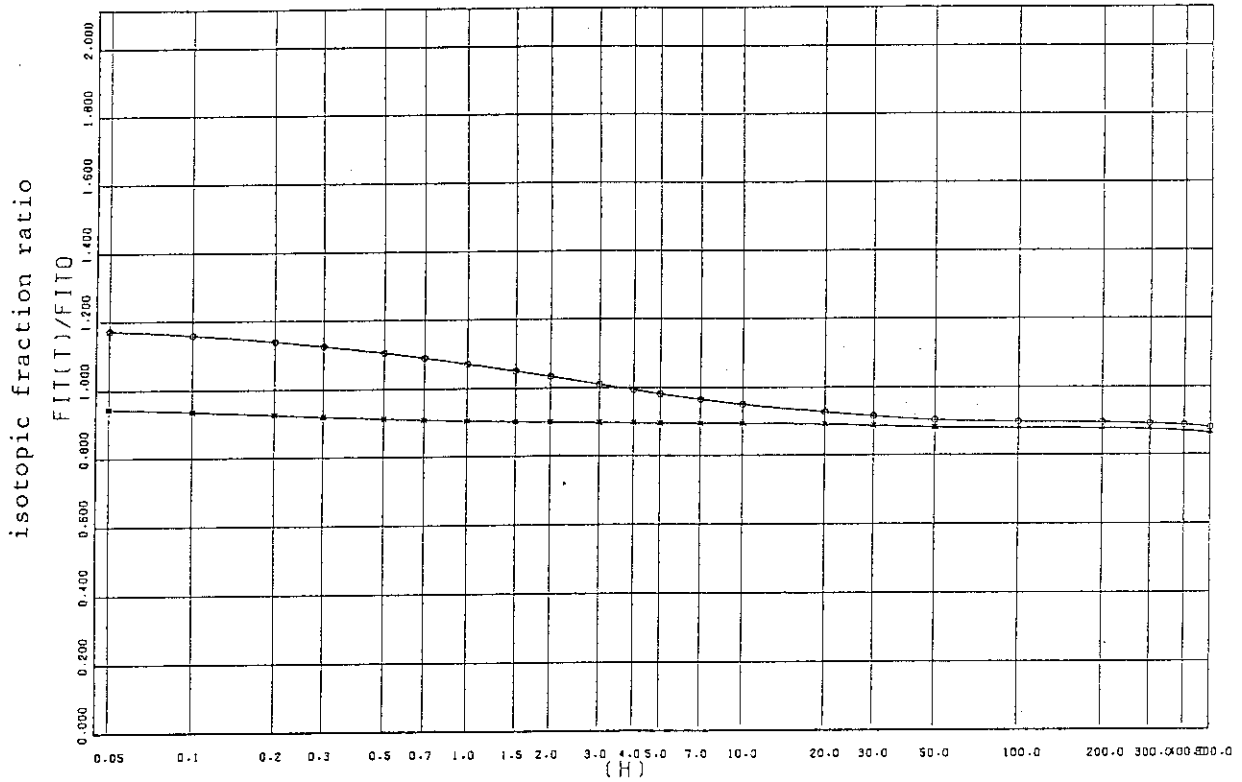


Fig. 20 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=75% DAY=7 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 ×=I133 ◇=I134

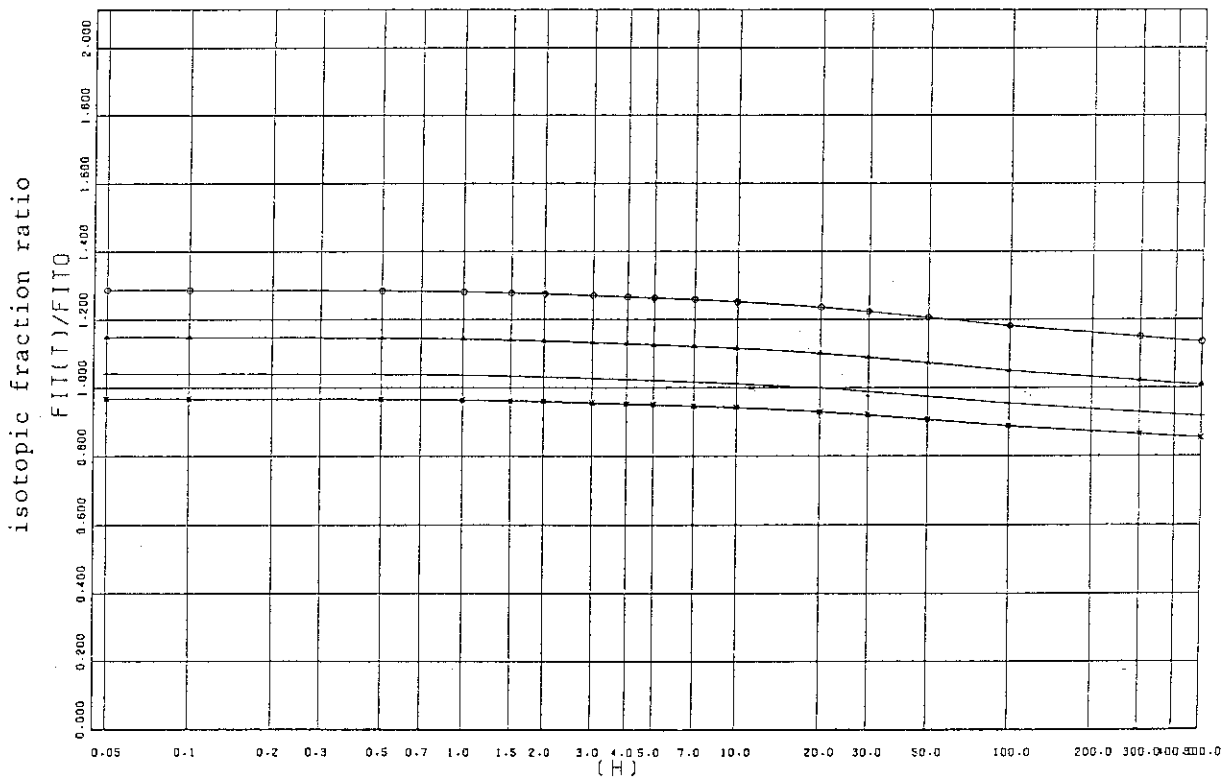


Fig. 21 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000
 ○=I135 △=I136

POWER=75%

DAY=7

ISOTOPE=I

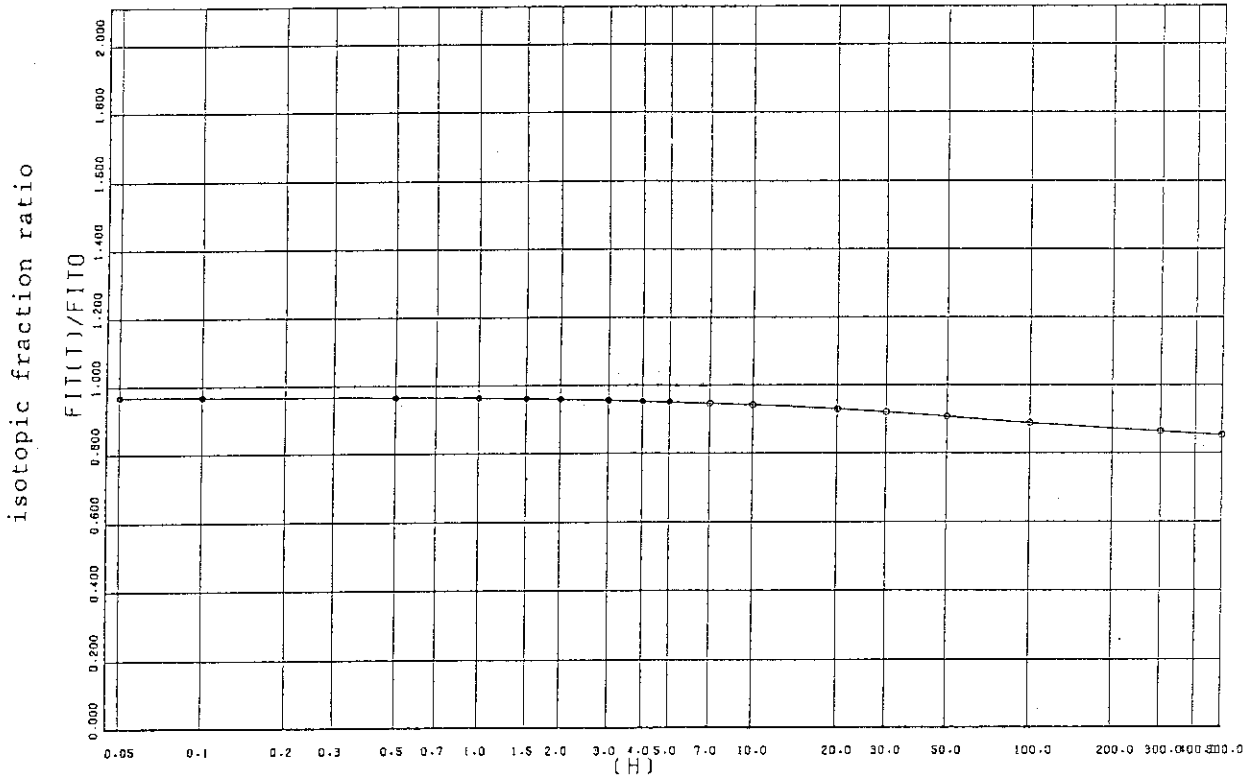


Fig. 22 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR83M △=KR85 +=KR85M X=KR87 ◇=KR88

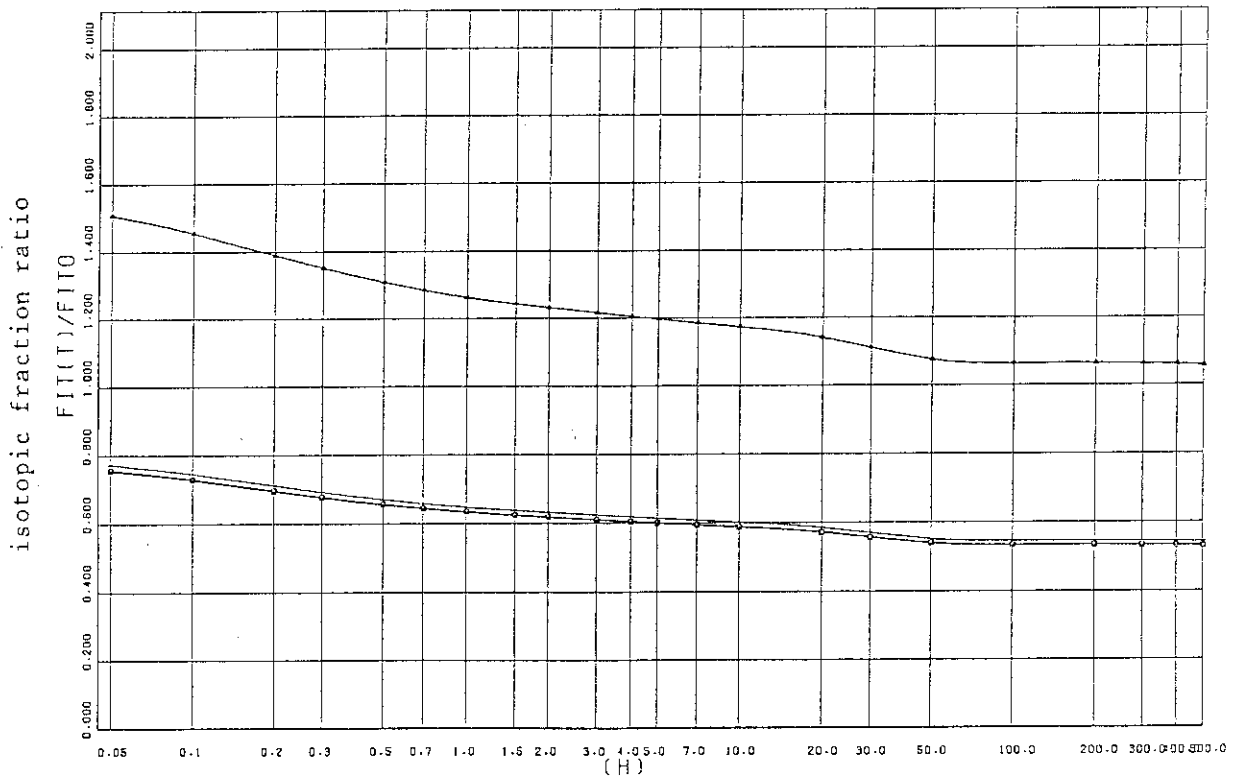


Fig. 23 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 +=XE131M X=XE133 ◇=XE133M

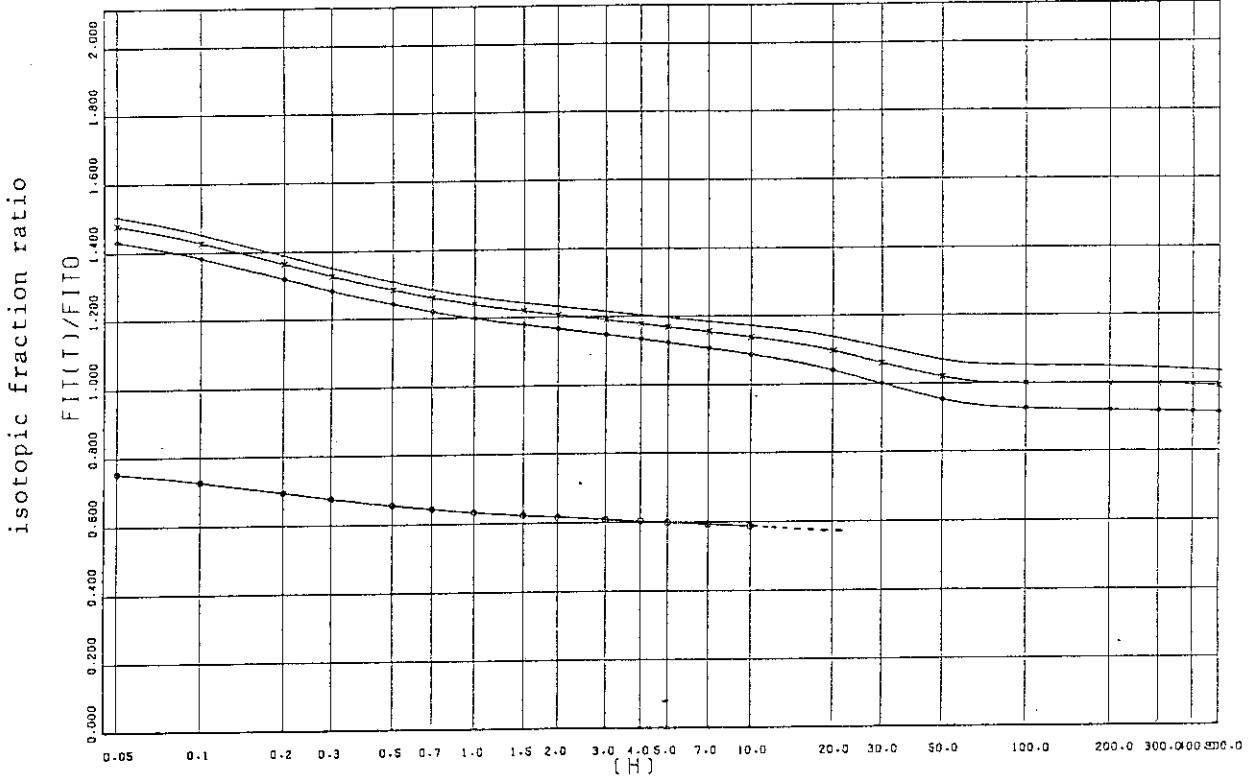


Fig. 24 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

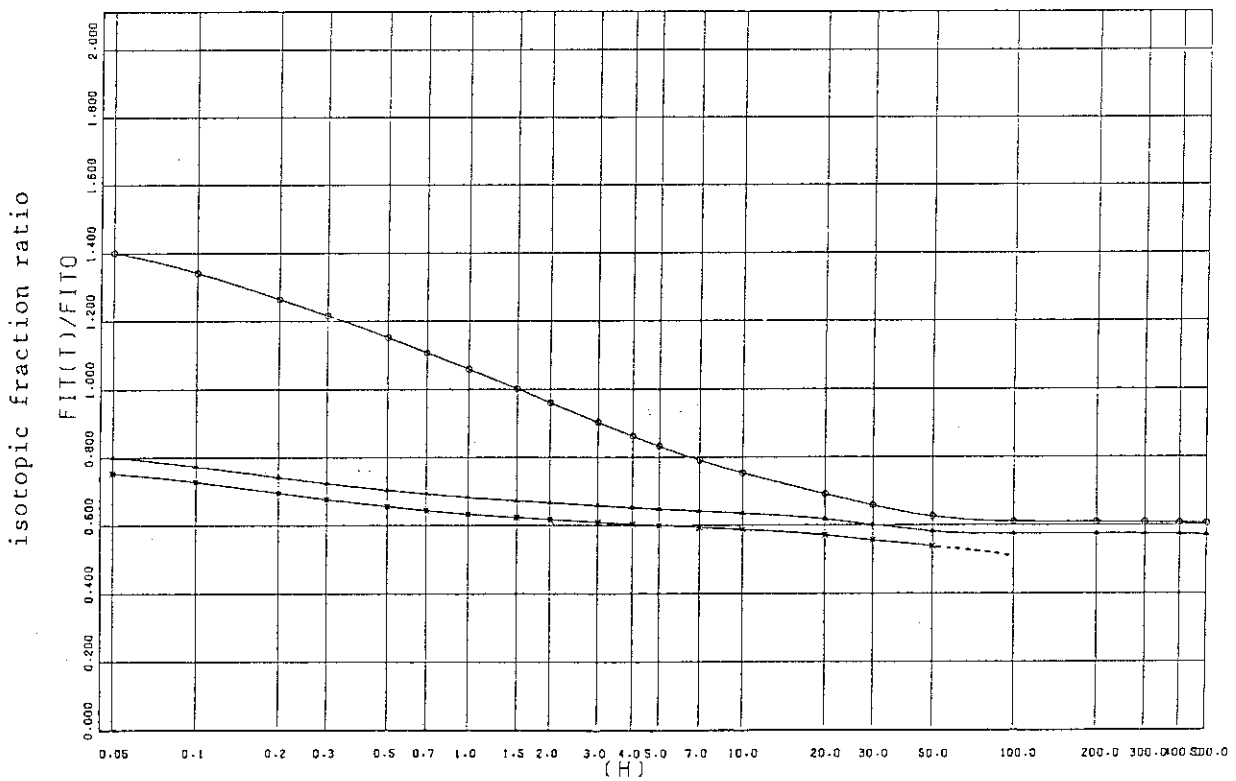


Fig. 25 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

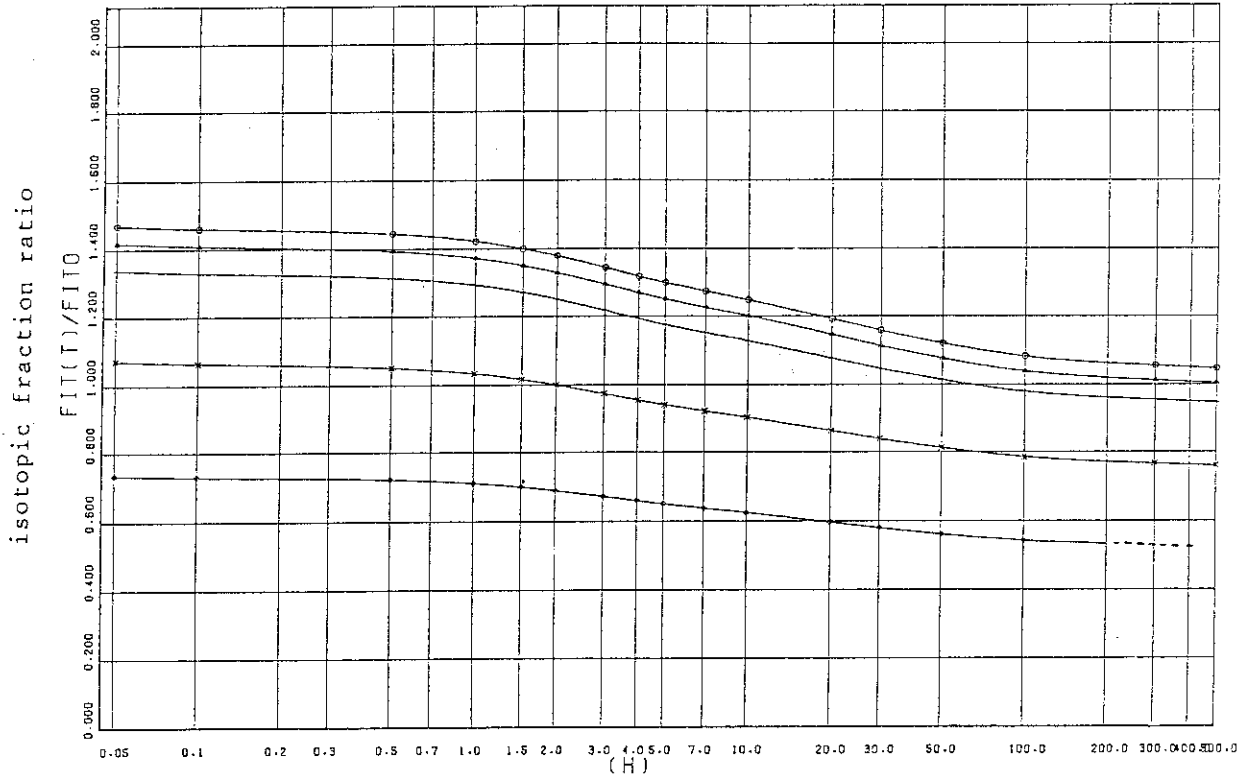


Fig. 26 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I135 △=I136

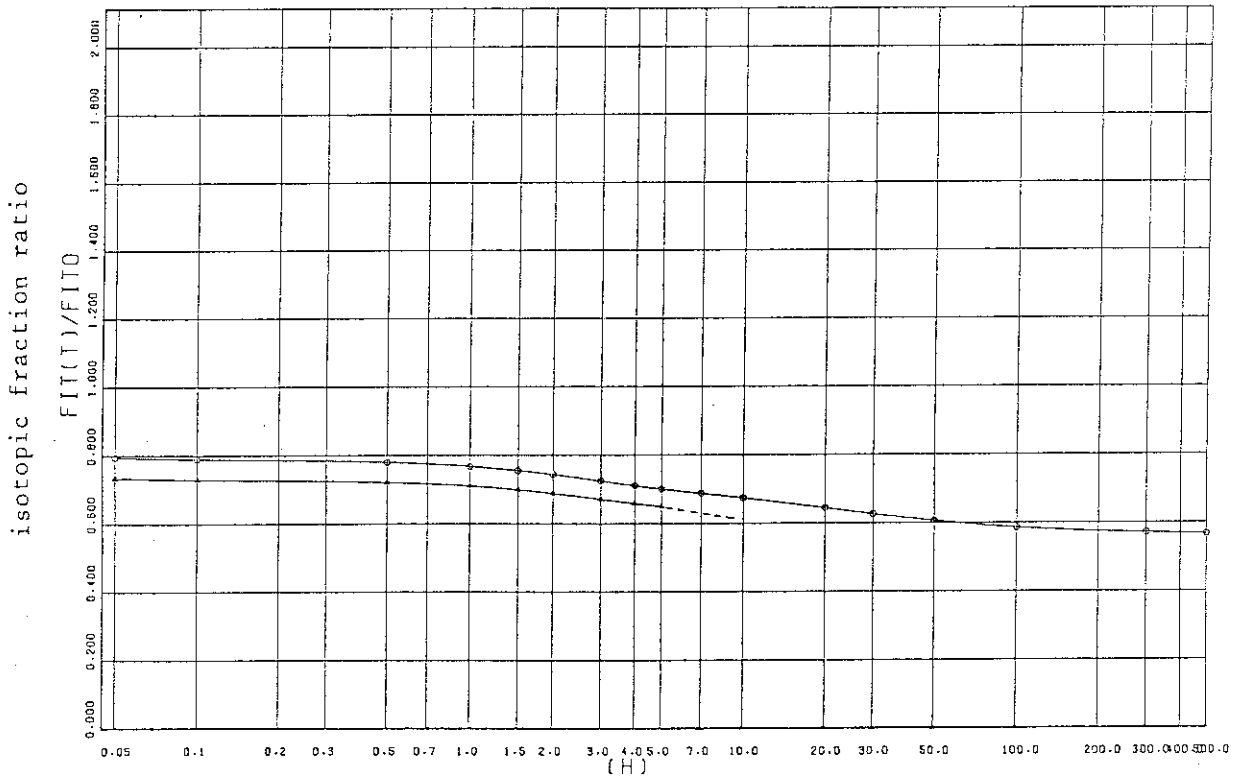


Fig. 27 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=50%

DAY=3

ISOTOPE=KR,XE

○=KR83M

△=KR85

+ =KR85M

×=KR87

◇=KR88

isotopic fraction ratio

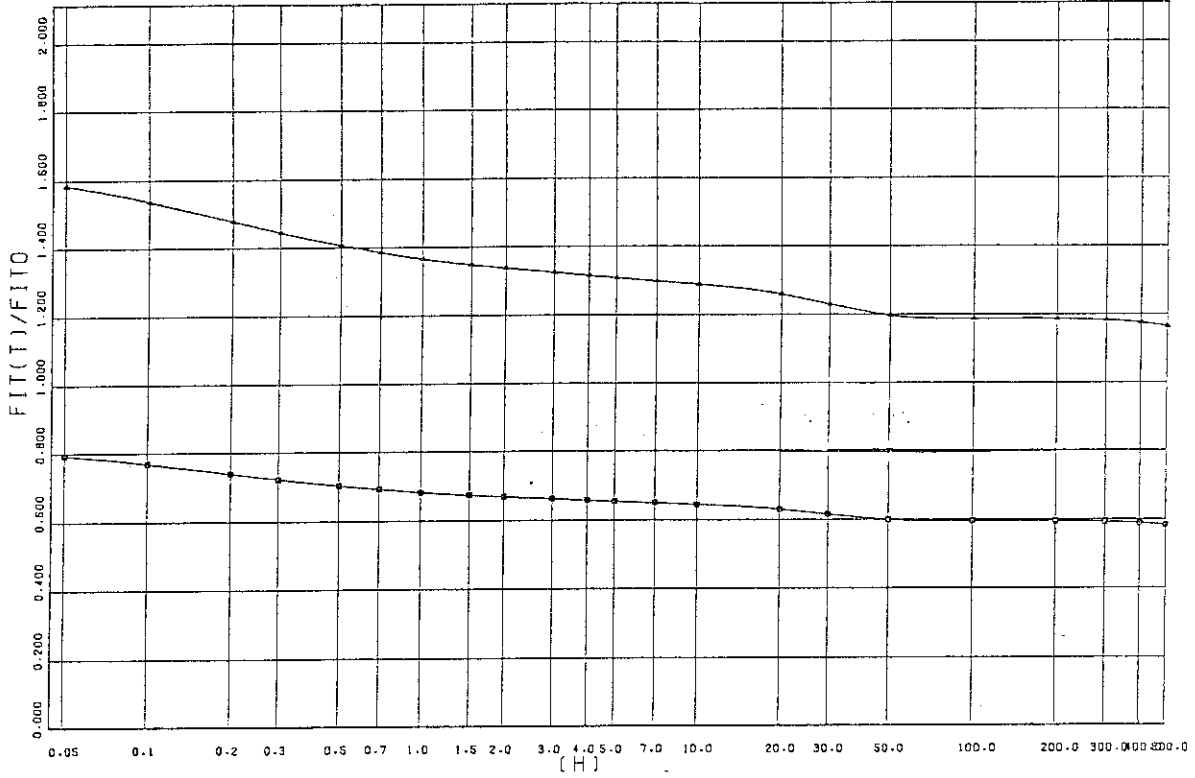


Fig. 28 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=50%

DAY=3

ISOTOPE=KR,XE

○=KR89

△=KR90

+ =XE131M

×=XE133

◇=XE133M

isotopic fraction ratio

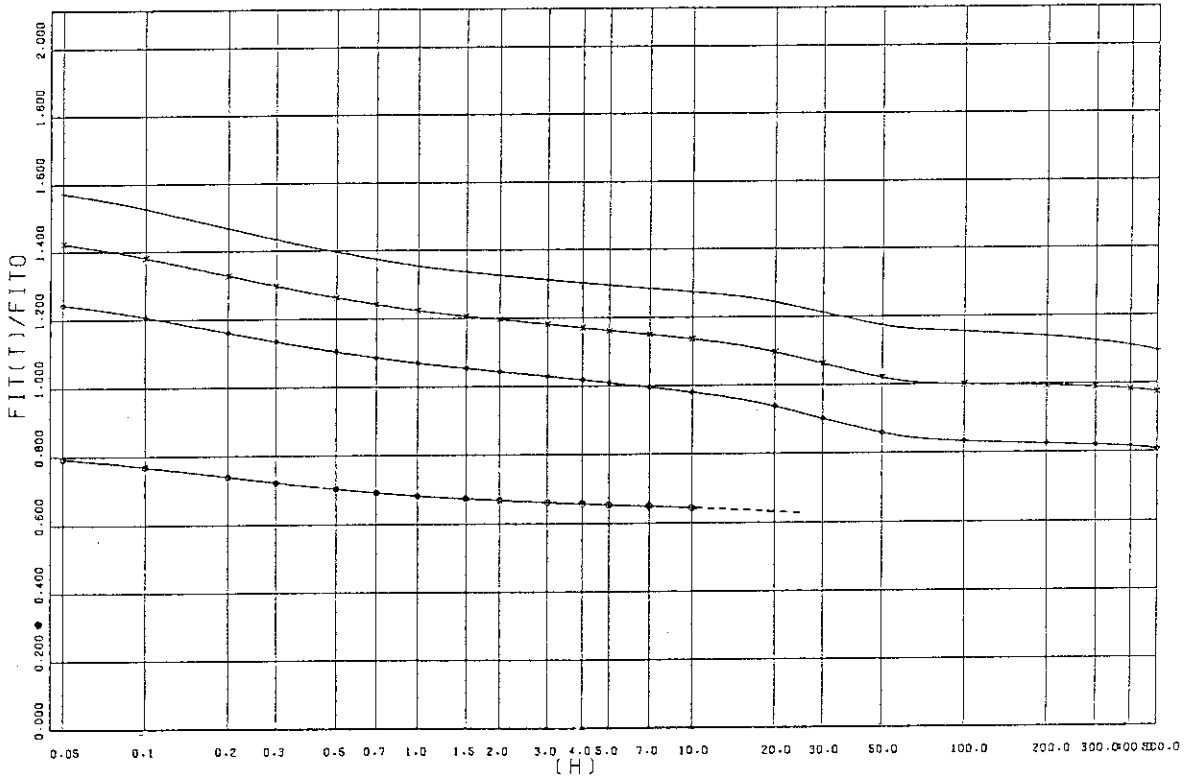


Fig. 29 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=3 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

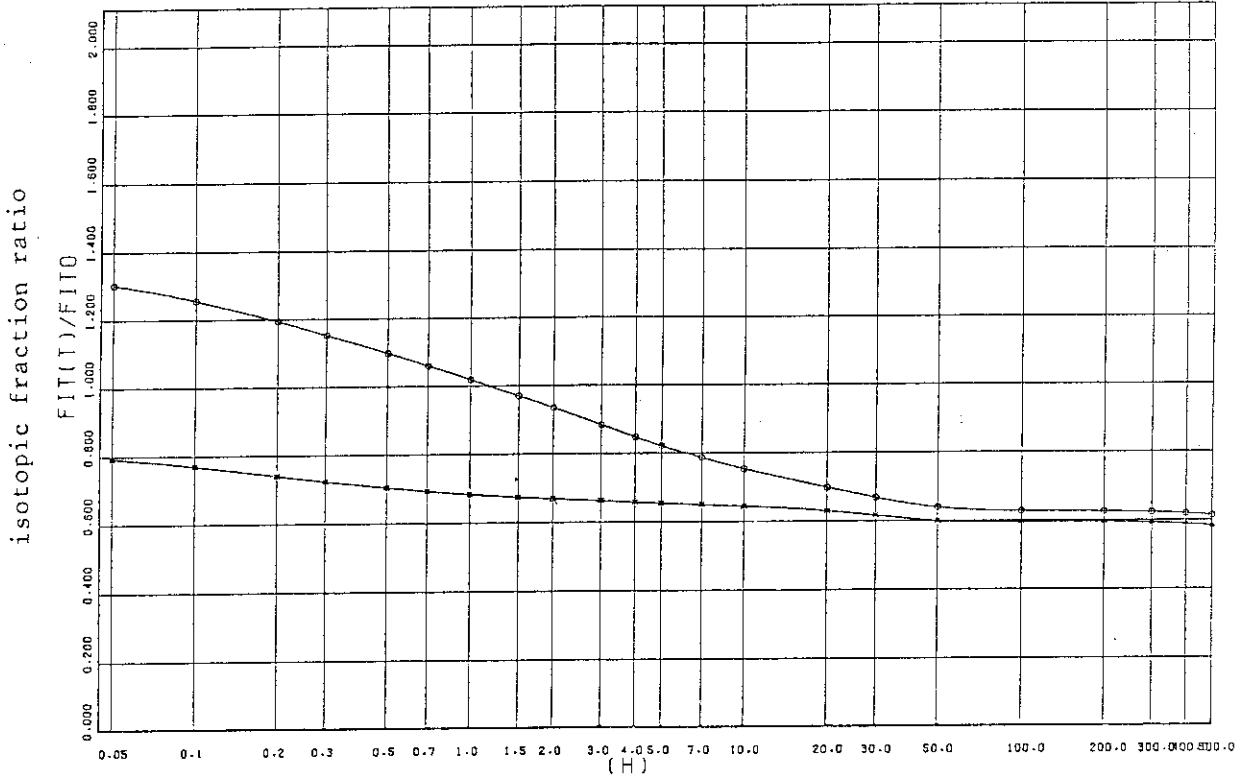


Fig. 30 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=3 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

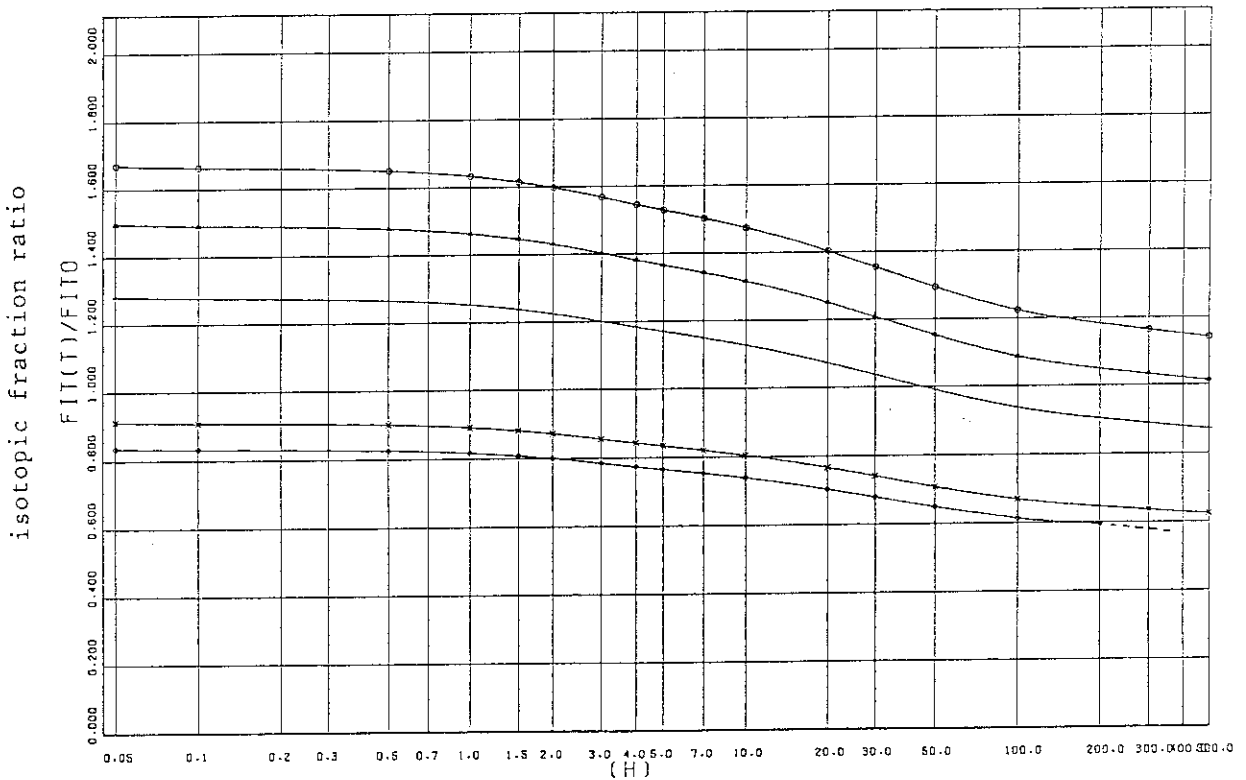


Fig. 31 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=50%

DAY=3

ISOTOPE=I

○=I135

△=I136

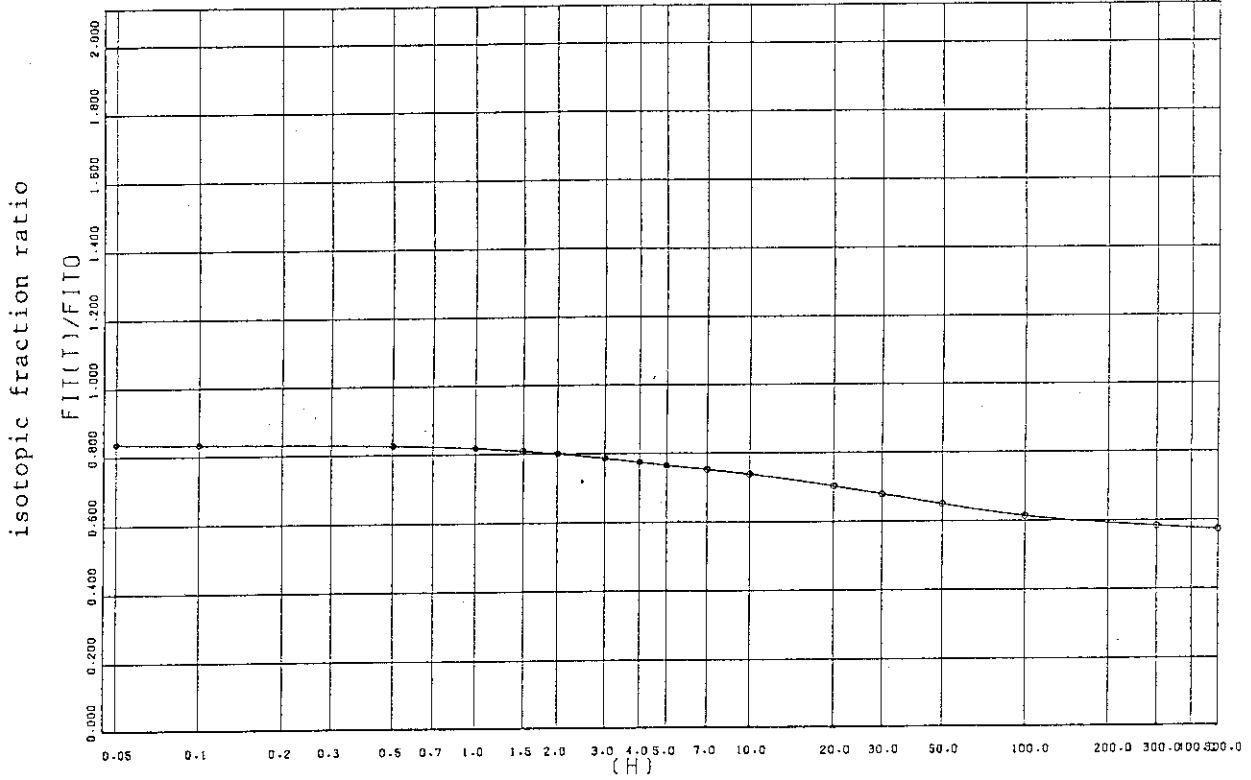


Fig. 32 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=50%

DAY=7

ISOTOPE=KR,XE

○=KR83M

△=KR85

+ =KR85M

X=KR87

◇=KR88

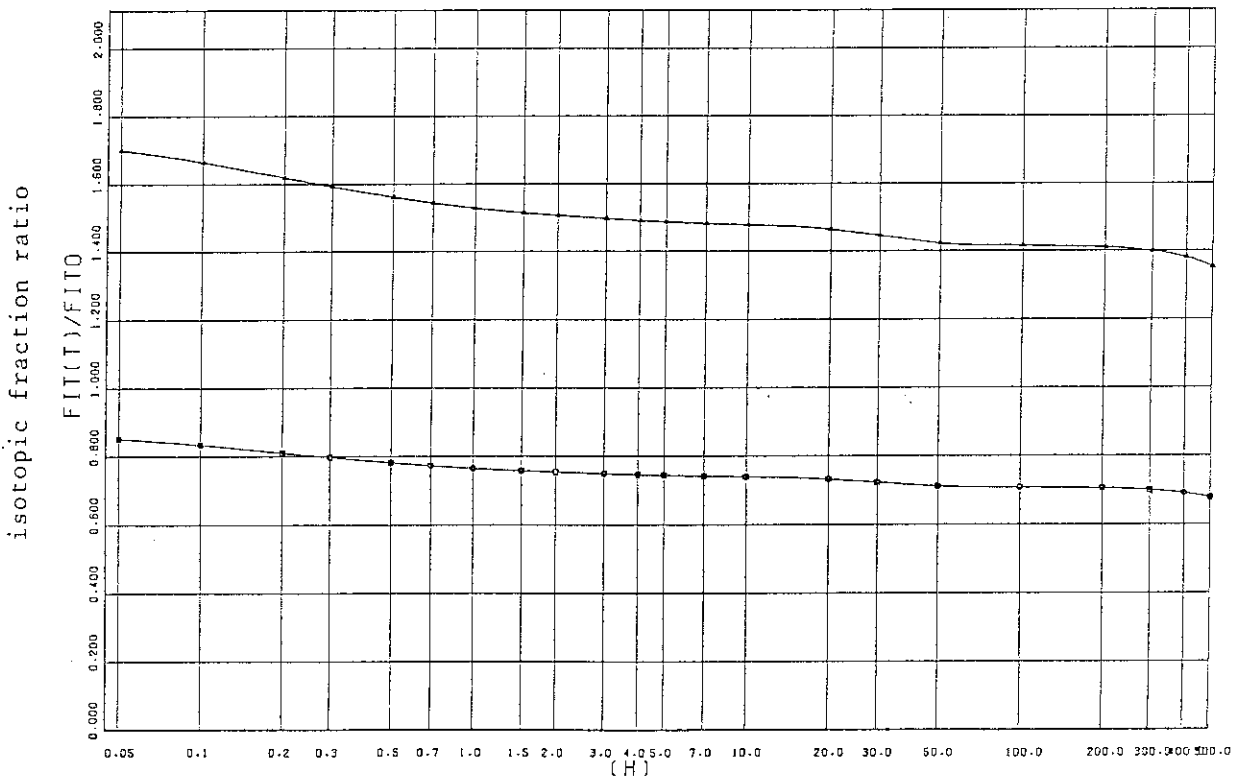


Fig. 33 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 +=XE131M X=XE133 ◇=XE133M

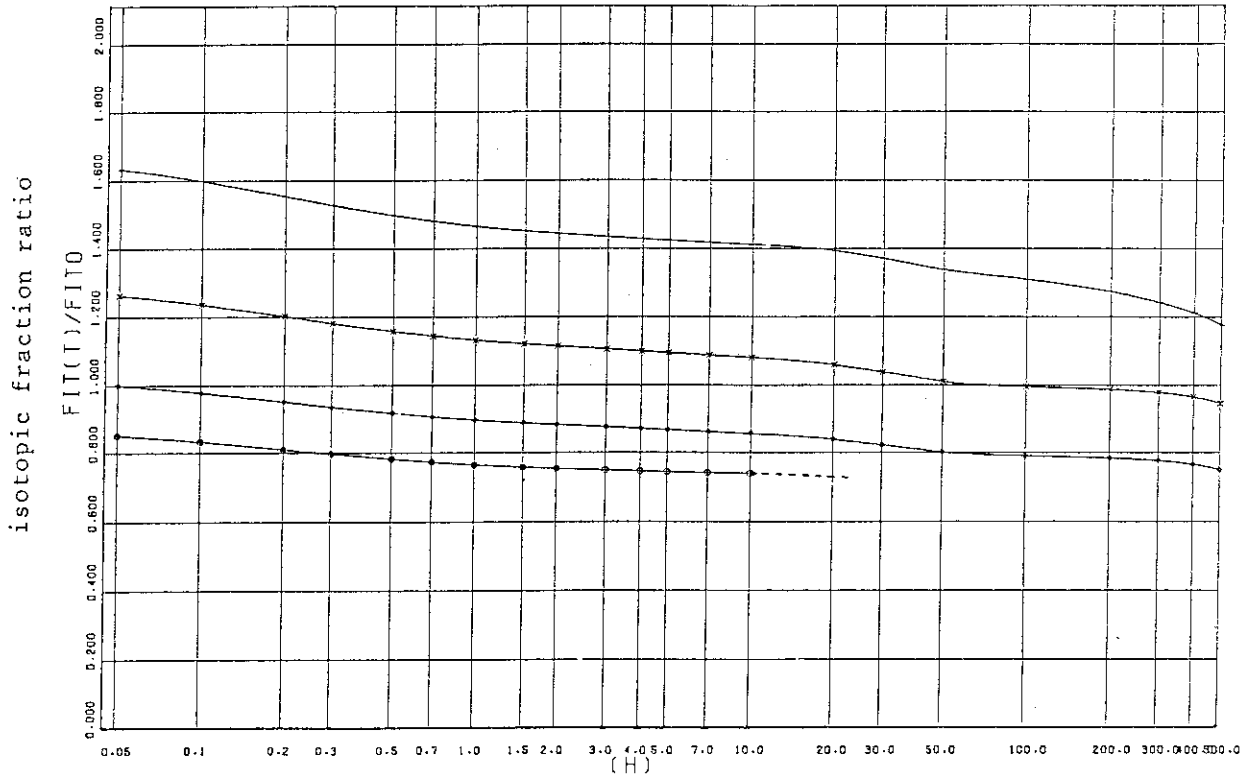


Fig. 34 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=50% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

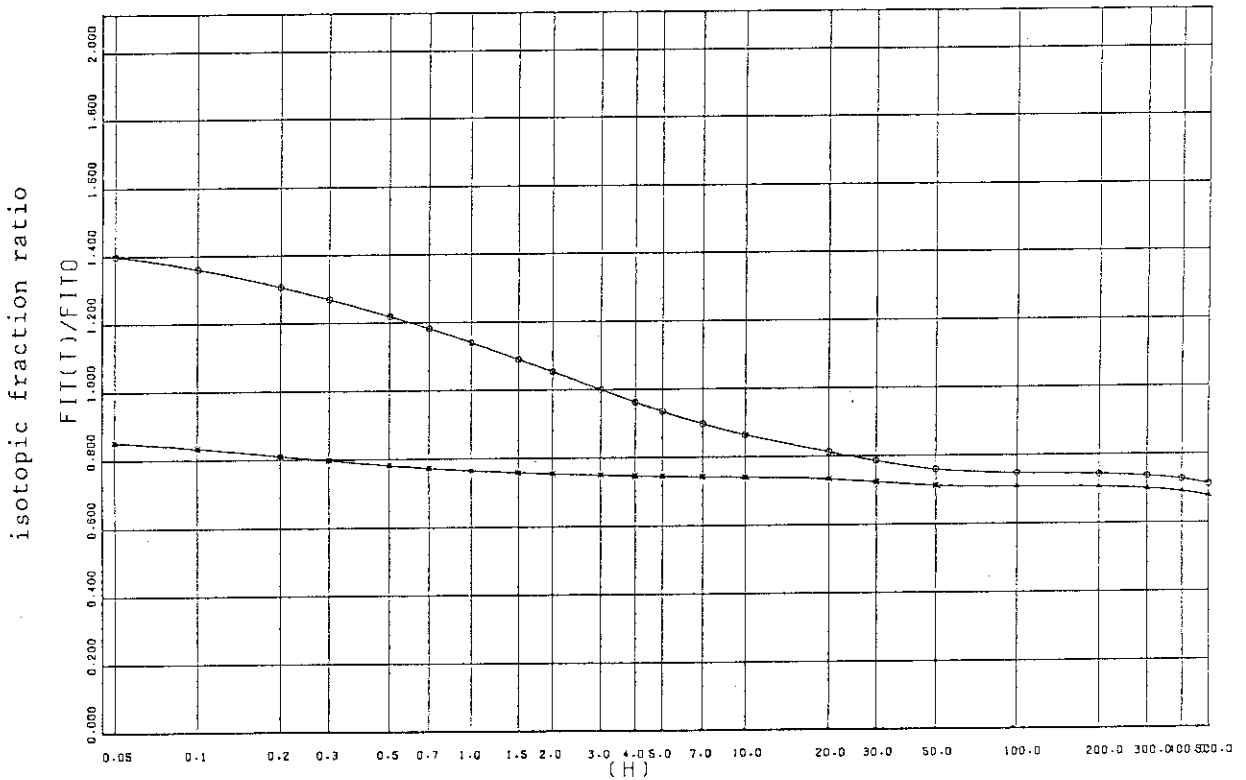


Fig. 35 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=50%

DAY=7

ISOTOPE=I

○=I129

△=I131

+ =I132

×=I133

◇=I134

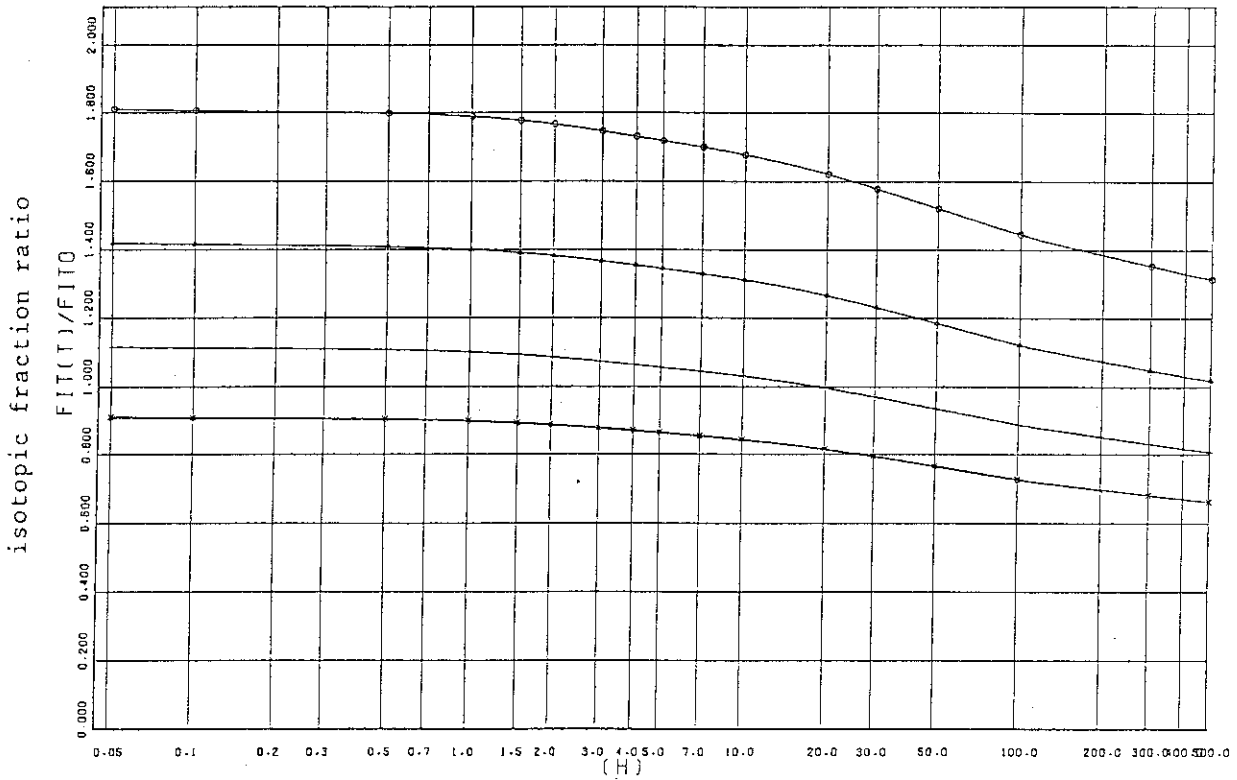


Fig. 36 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=50%

DAY=7

ISOTOPE=I

○=I135

△=I136

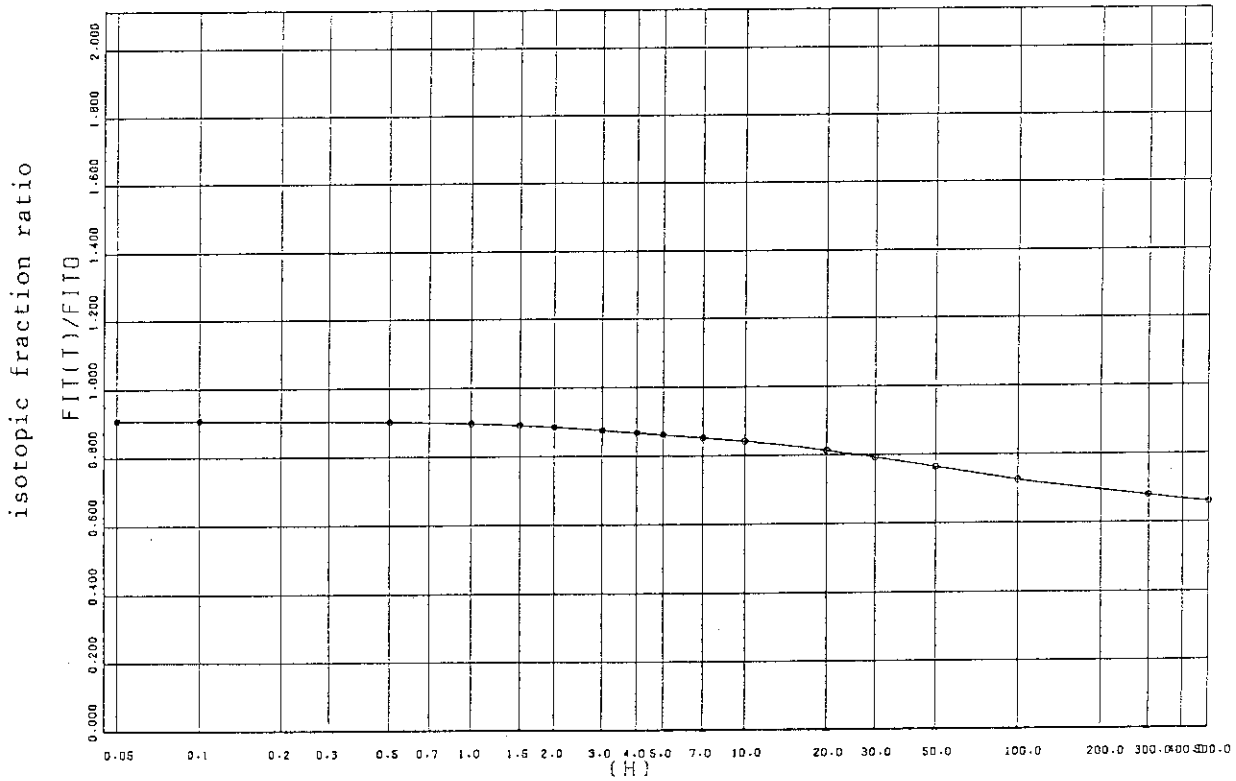


Fig. 37 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR83M △=KR85 + =KR85M X=KR87 ◇=KR88

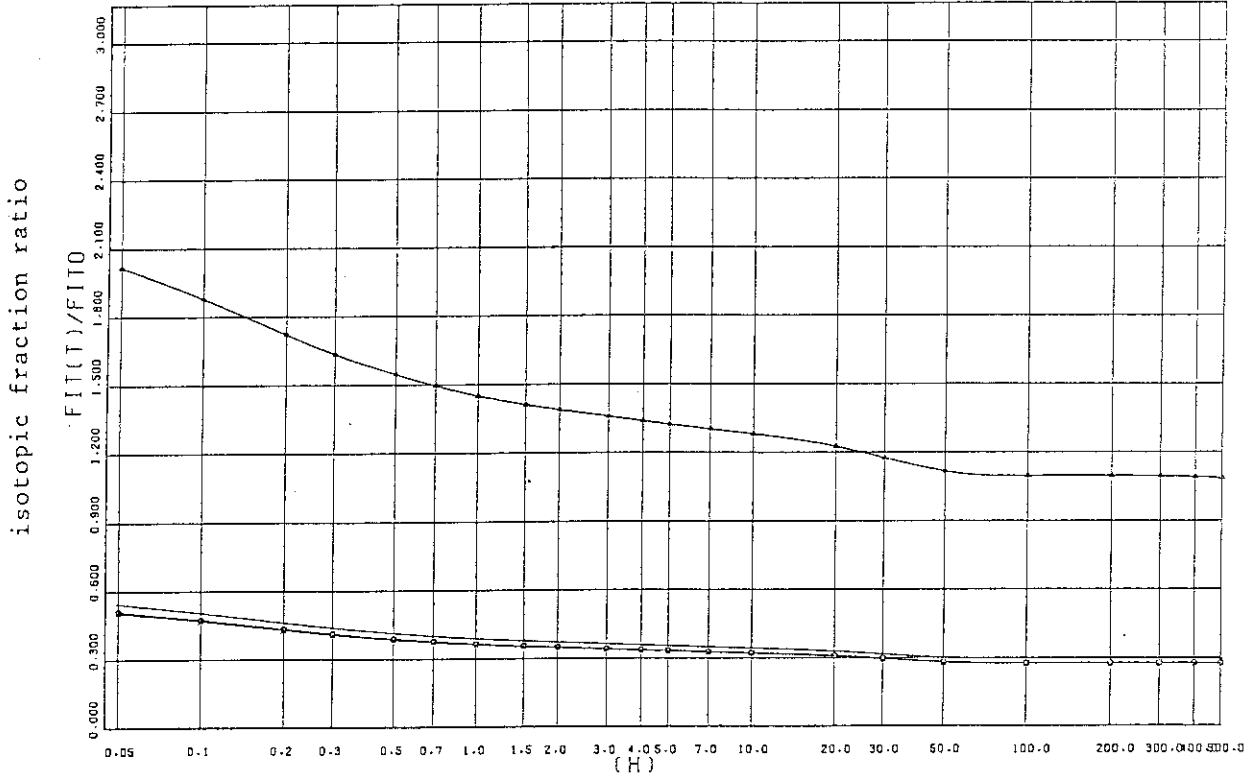


Fig. 38 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 + =XE131M X=XE133 ◇=XE133M

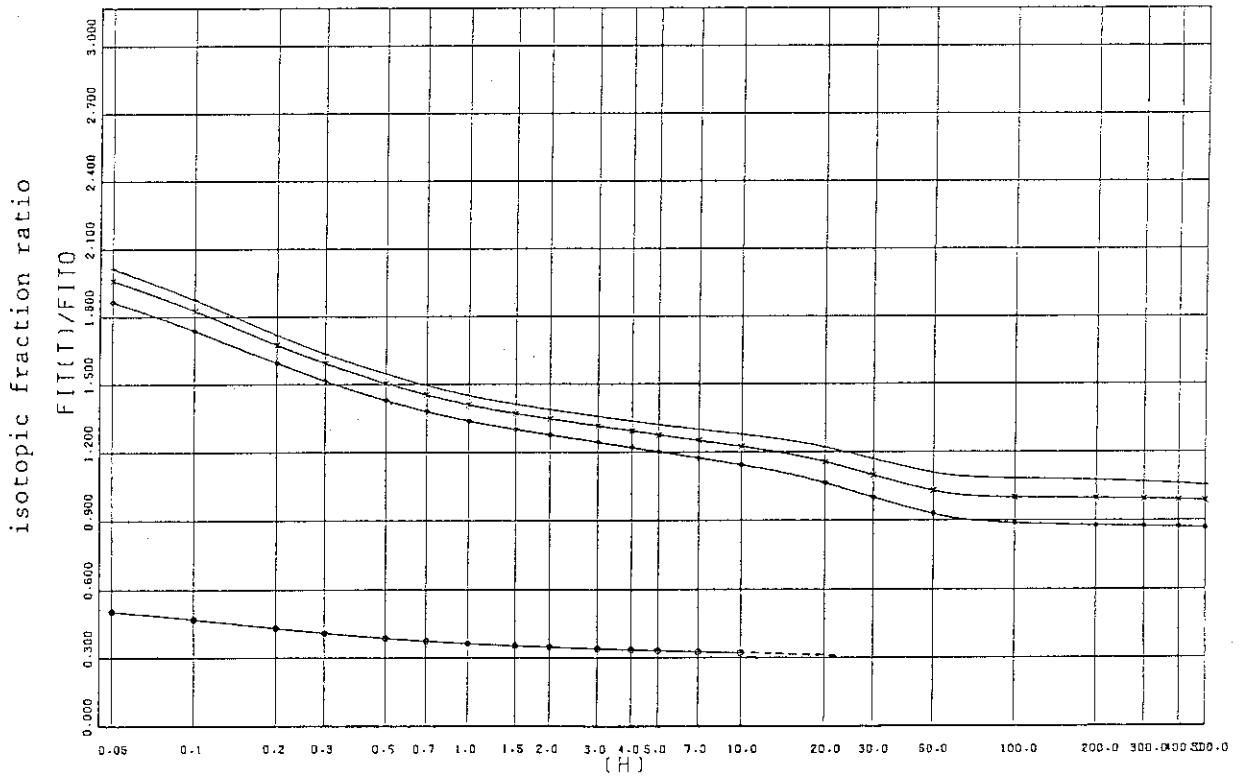


Fig. 39 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 Δ=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

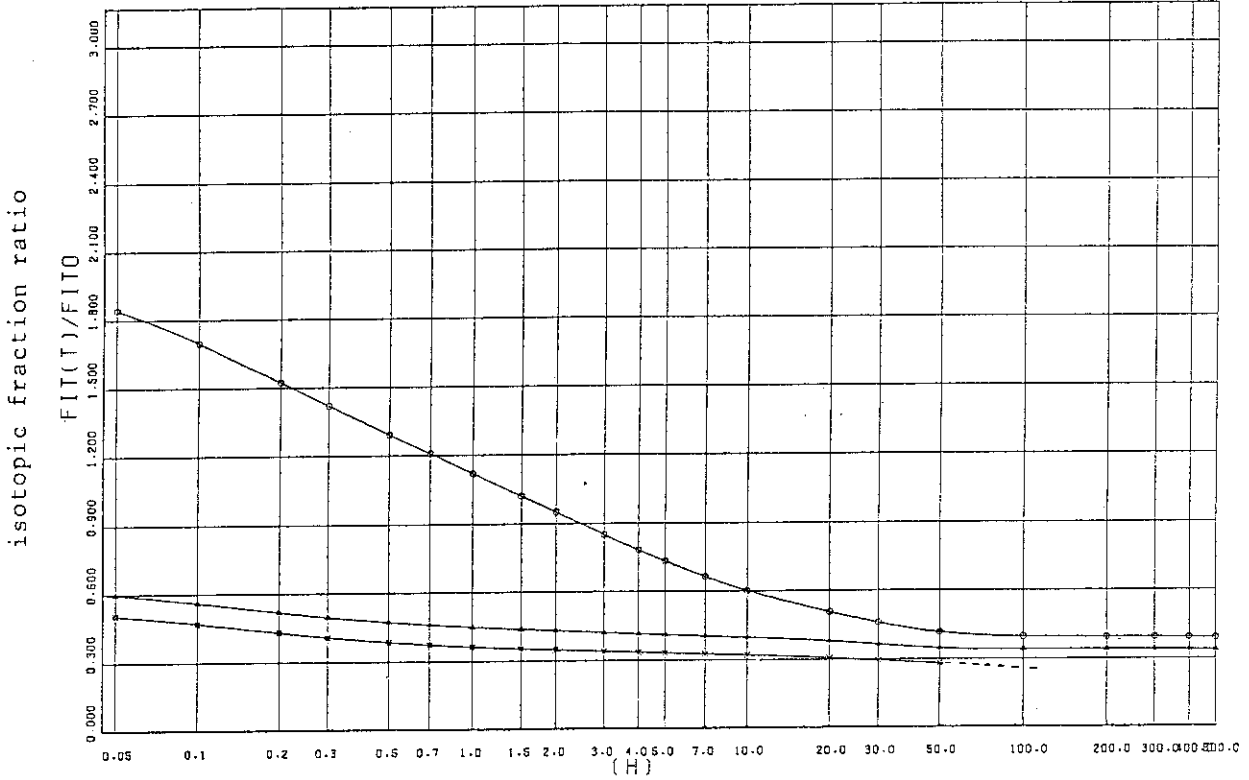


Fig. 40 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I129 Δ=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

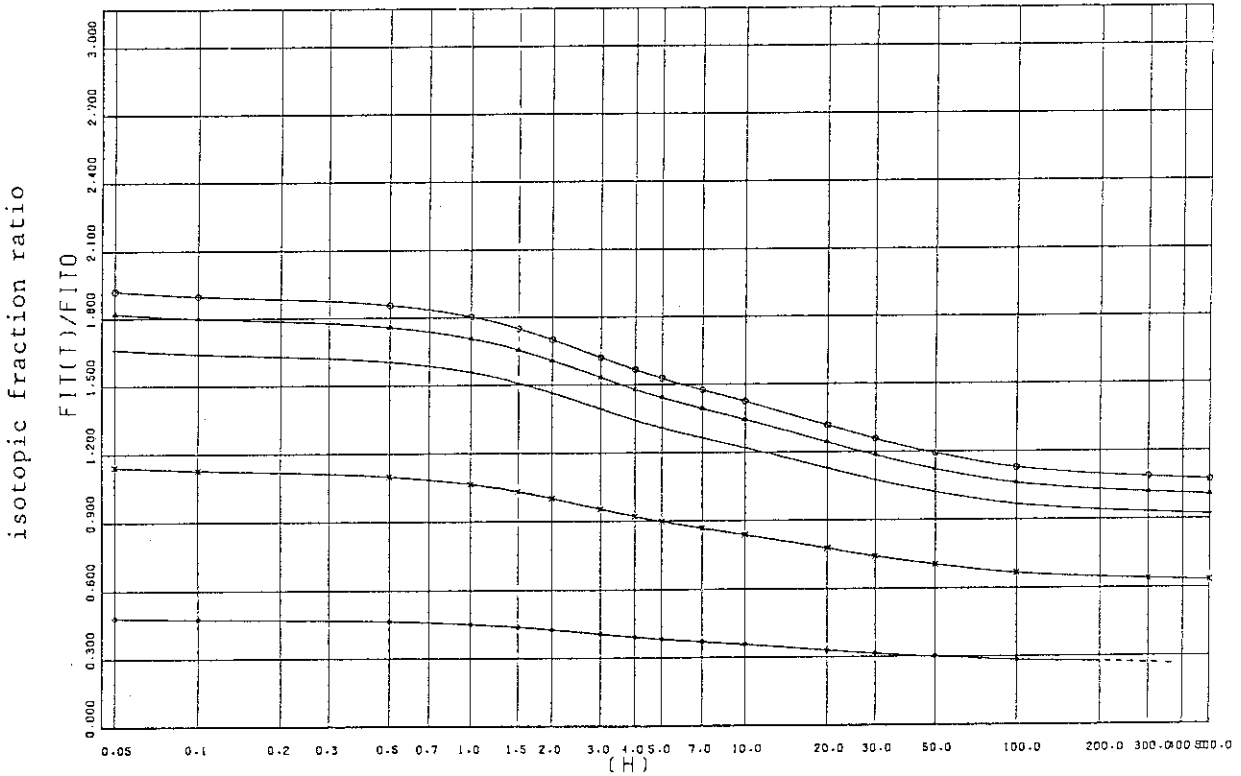


Fig. 41 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

JAERI-M 85-012
 BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I135 △=I136

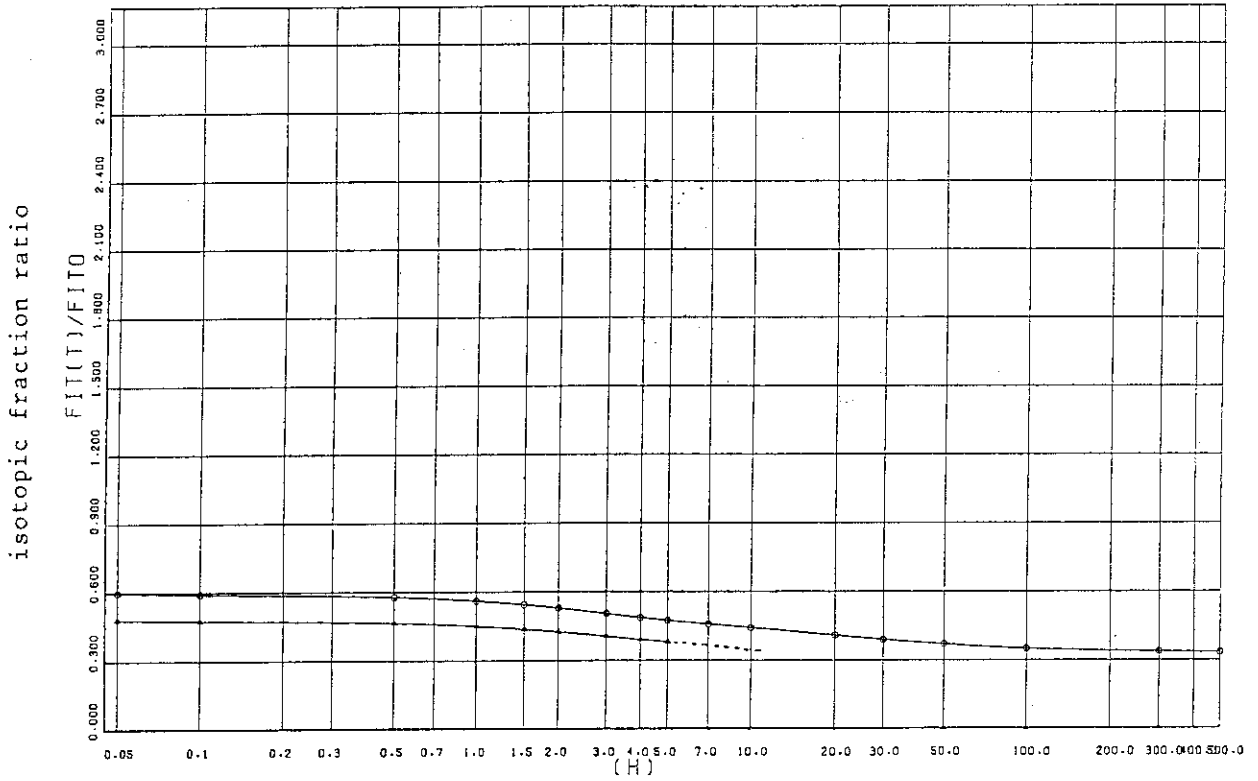


Fig. 42 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=3 ISOTOPE=KR.XE
 ○=KR83M △=KR85 + =KR85M ×=KR87 ◇=KR88

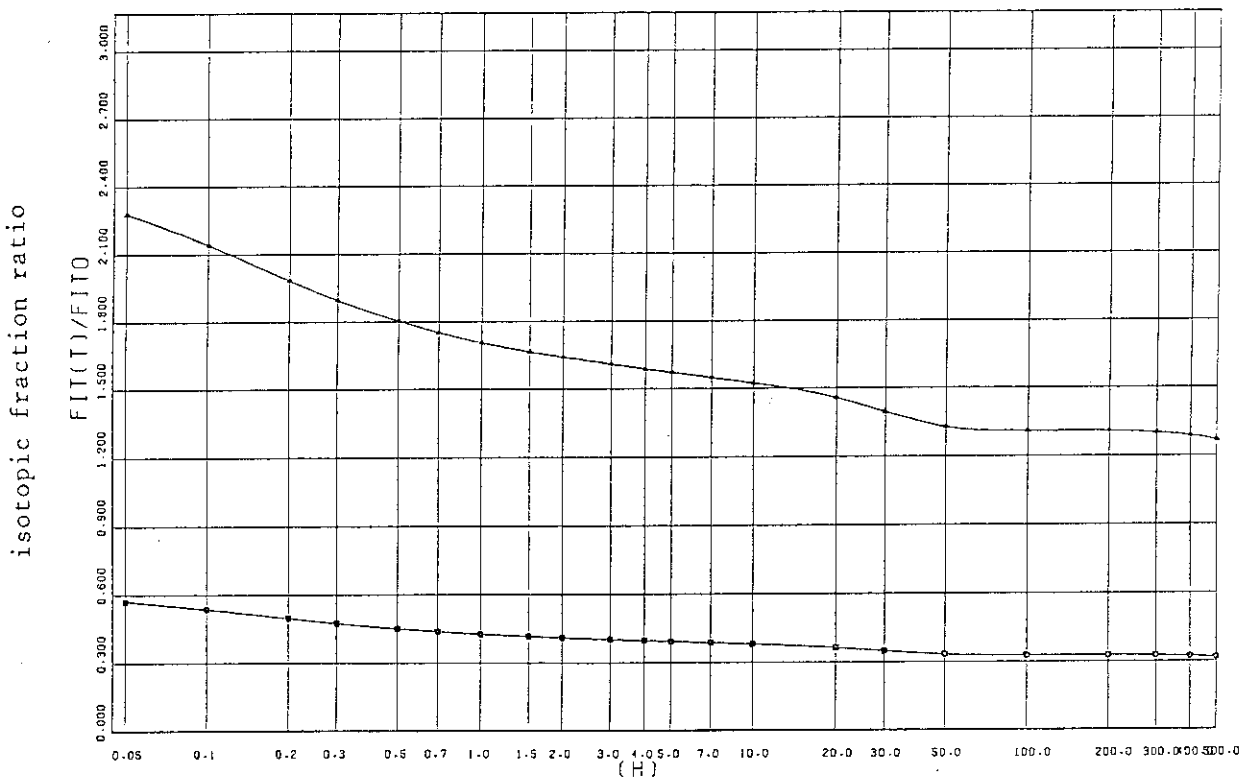


Fig. 43 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=3 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 +=XE131M X=XE133 ◇=XE133M

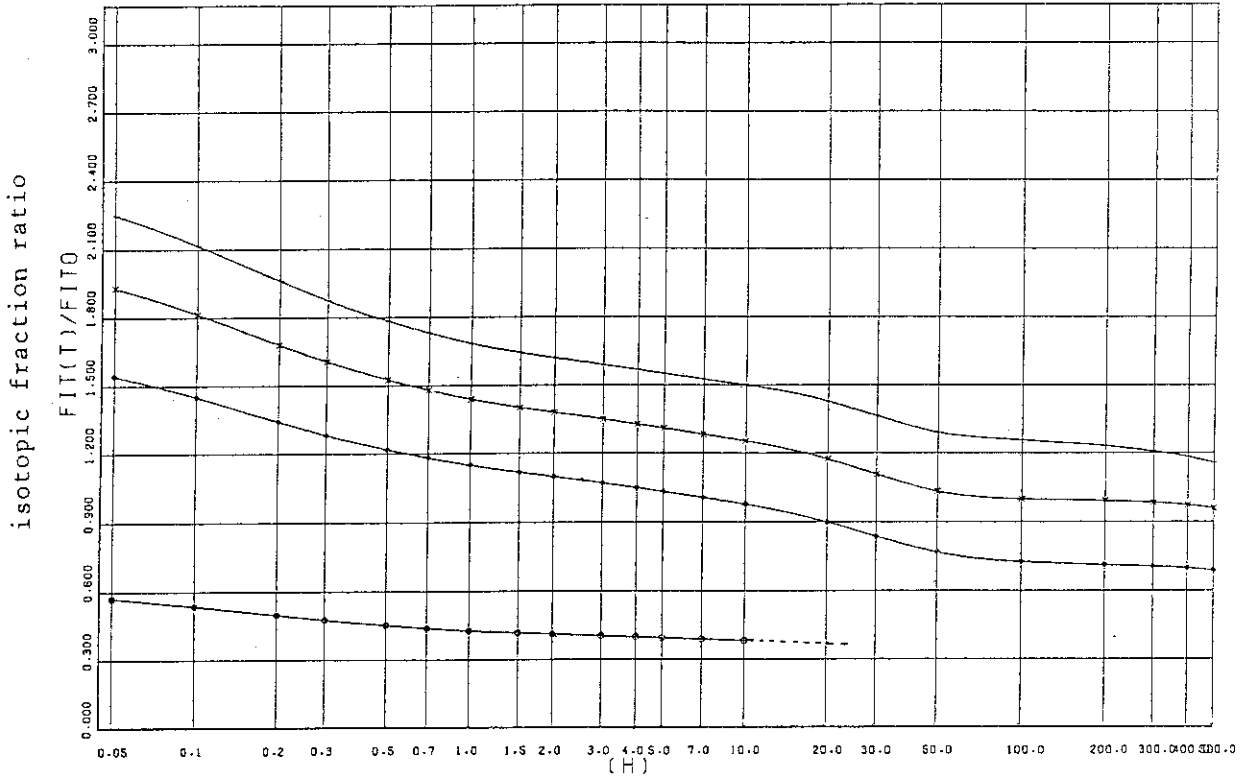


Fig. 44 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=3 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

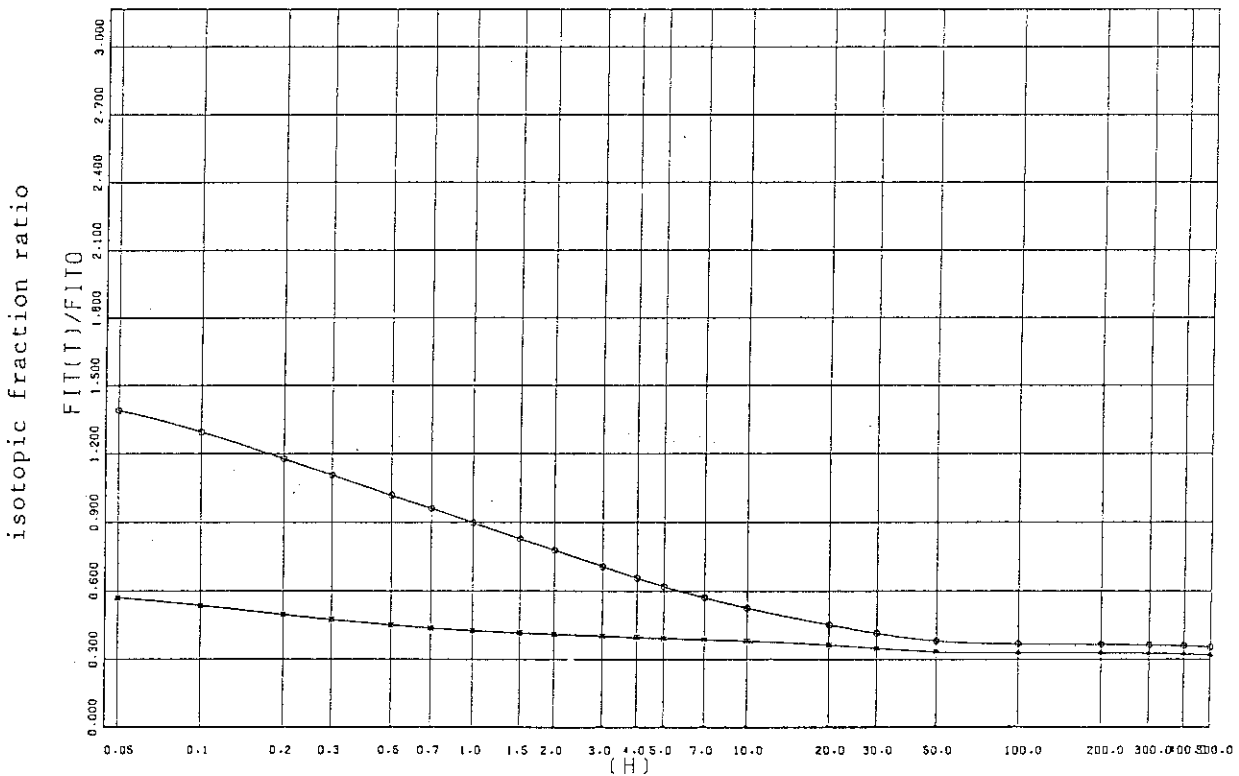


Fig. 45 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=3 ISOTOPE=1
 ○=I129 △=I131 +=I132 ×=I133 ◇=I134

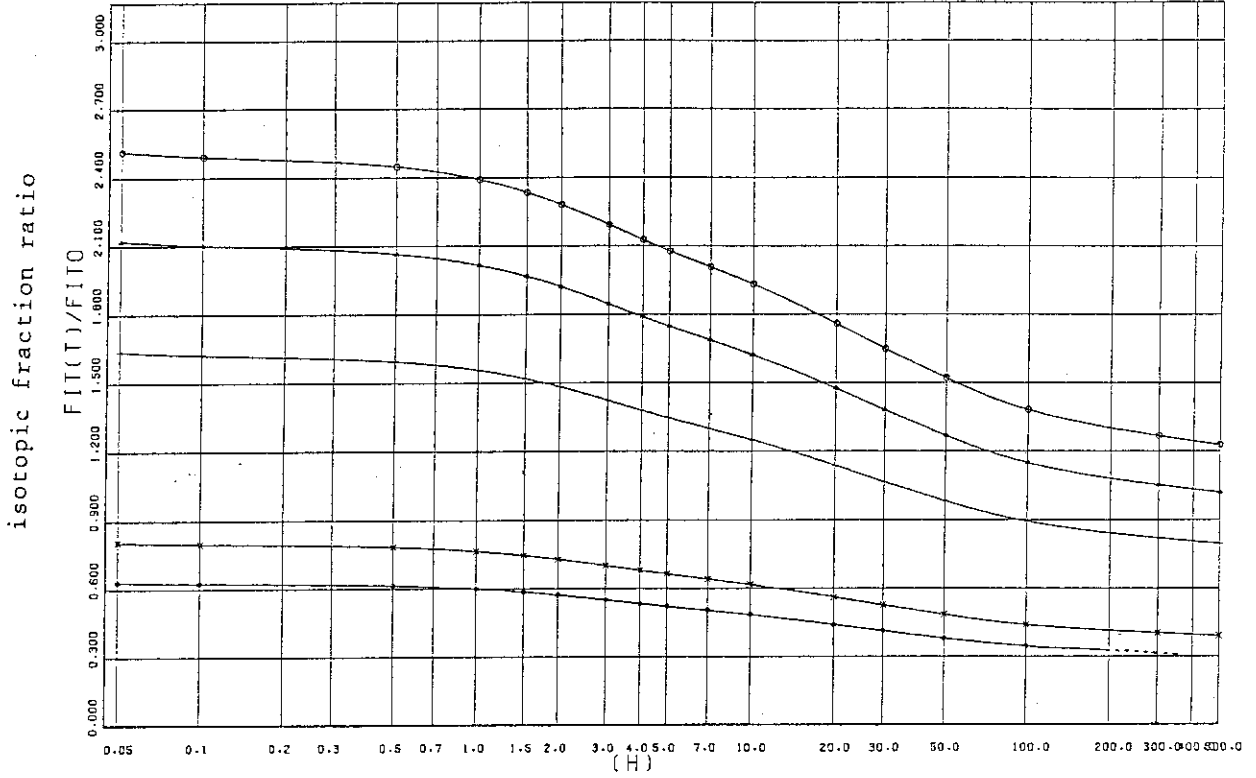


Fig.46 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=3 ISOTOPE=1
 ○=I135 △=I136

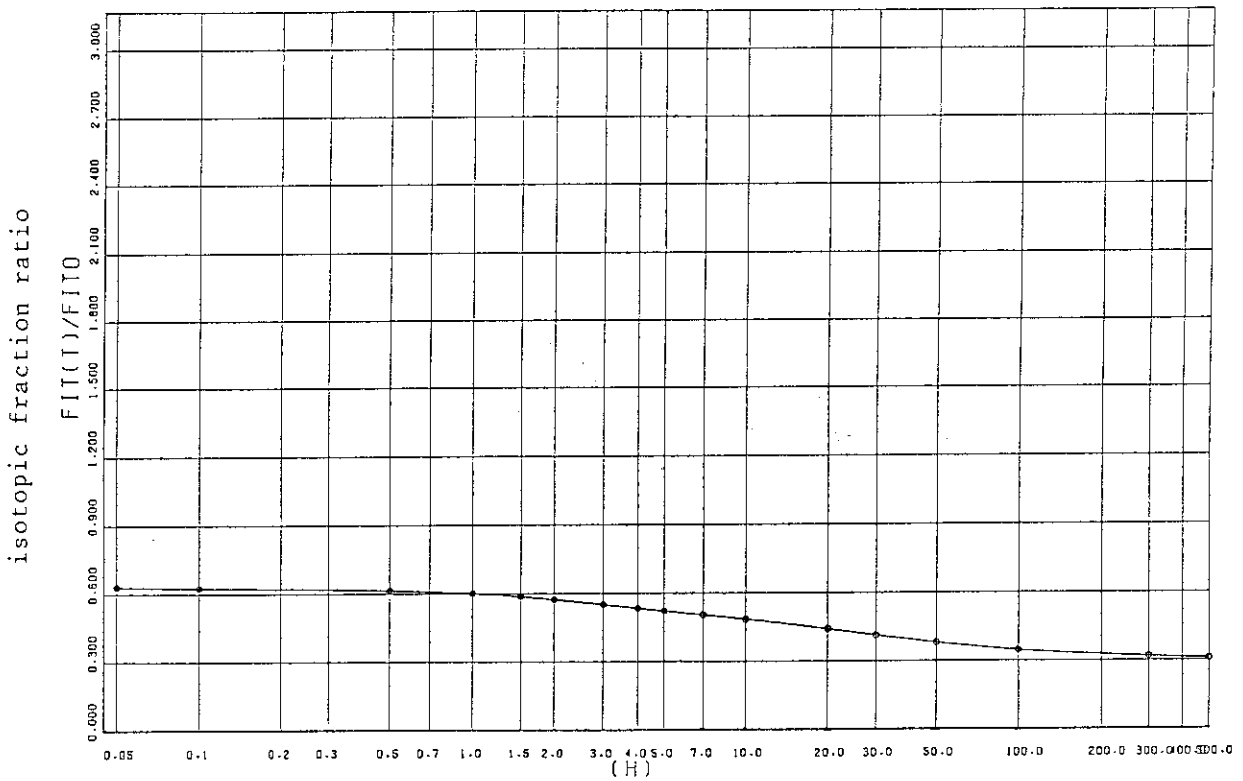


Fig.47 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR83M △=KR85 +=KR85M X=KR87 ◇=KR88

isotopic fraction ratio

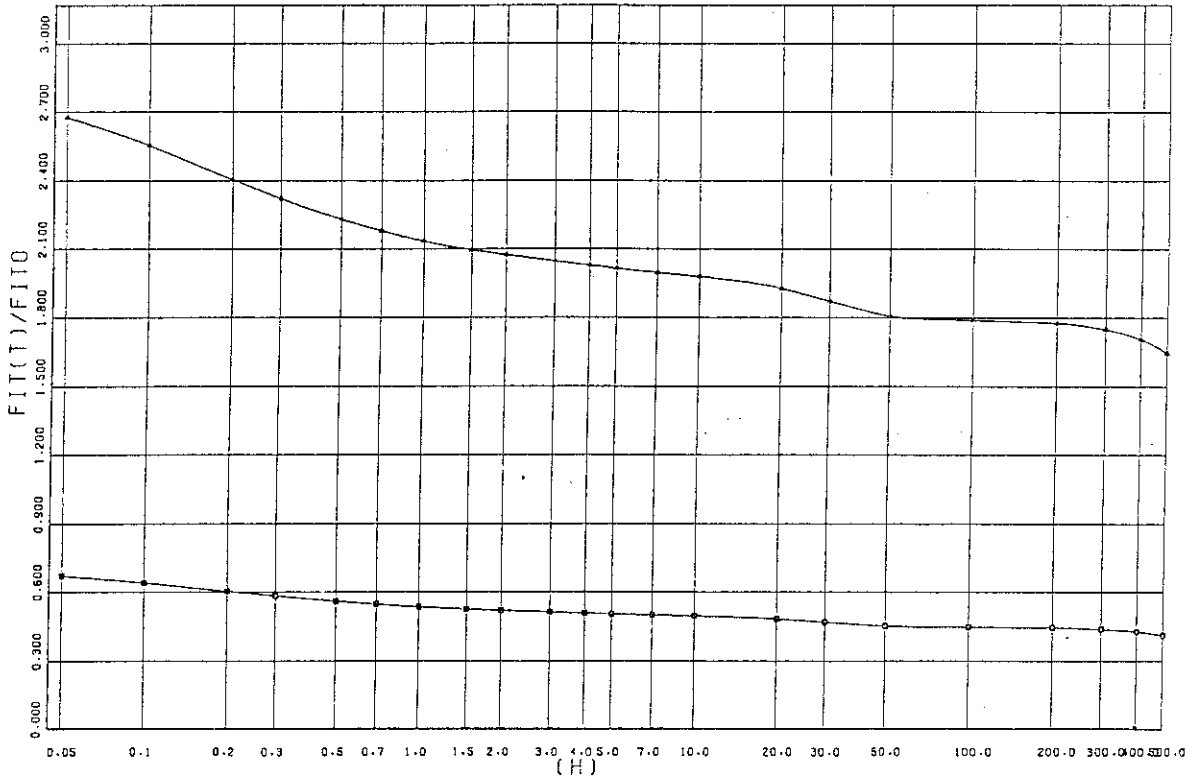


Fig. 48 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=7 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 +=XE131M X=XE133 ◇=XE133M

isotopic fraction ratio

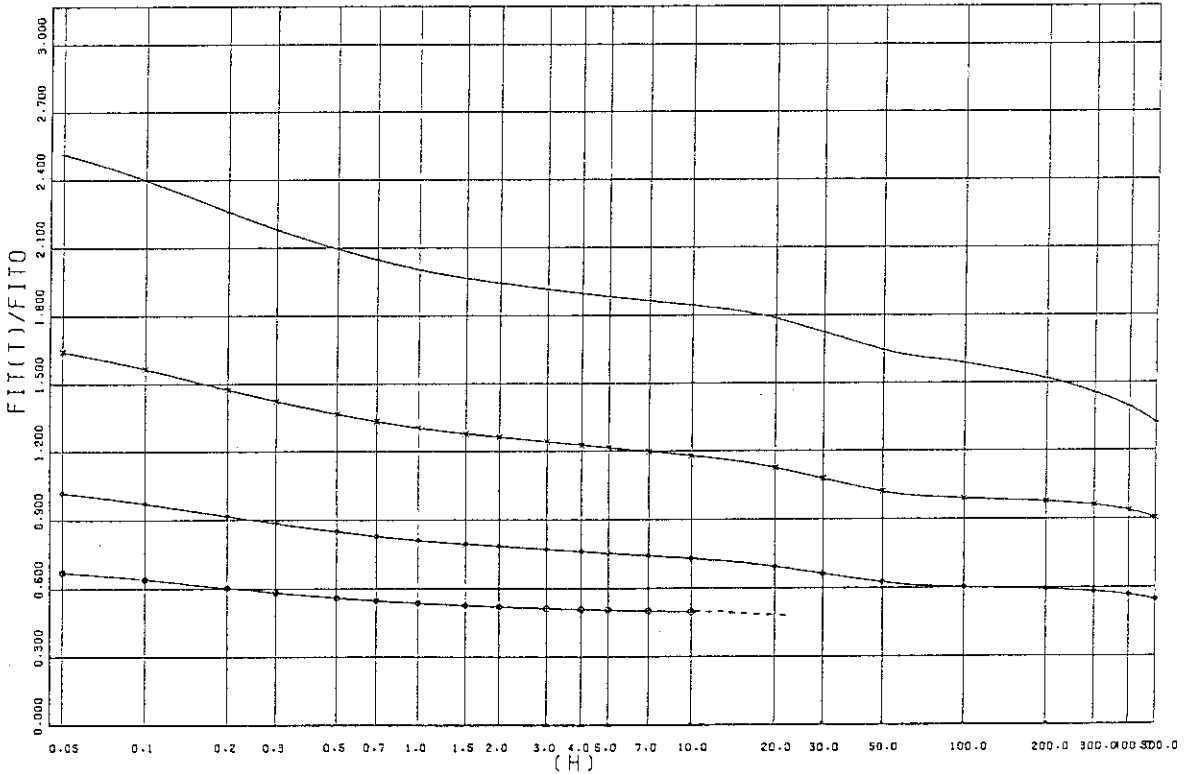


Fig. 49 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

JAERI-M 85-012
 BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=7 ISOTOPE=KR.XE
 ○=XE135 △=XE135M +=XE137 X=XE138 ◇=XE139

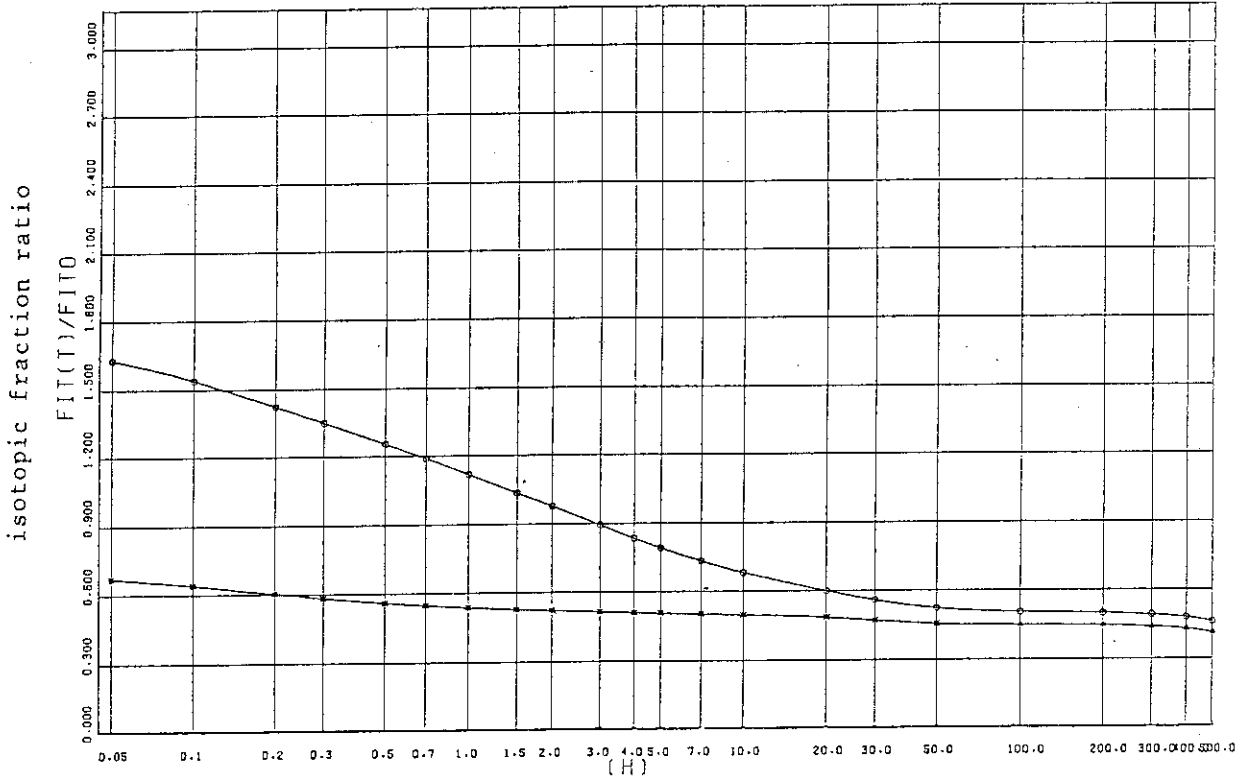


Fig. 50 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000 POWER=25% DAY=7 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

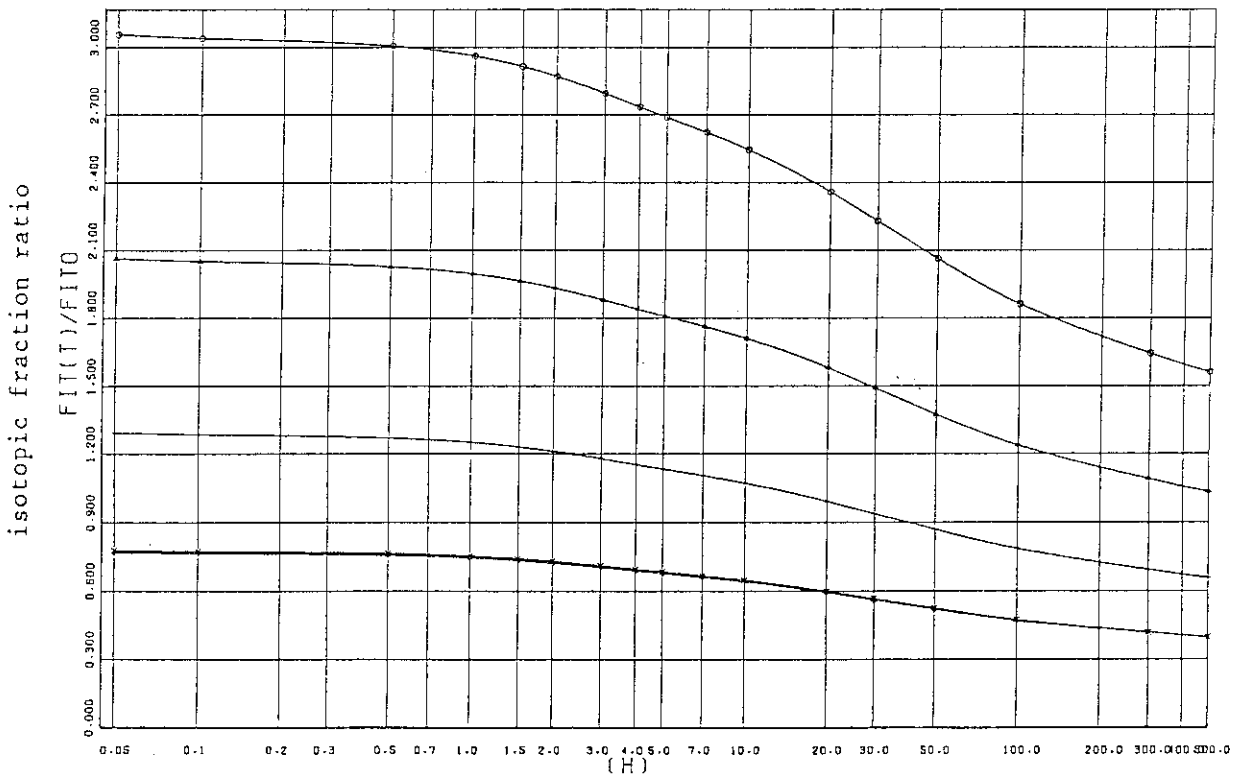


Fig. 51 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=30000

POWER=25%

DAY=7

ISOTOPE=I

○=I135

△=I136

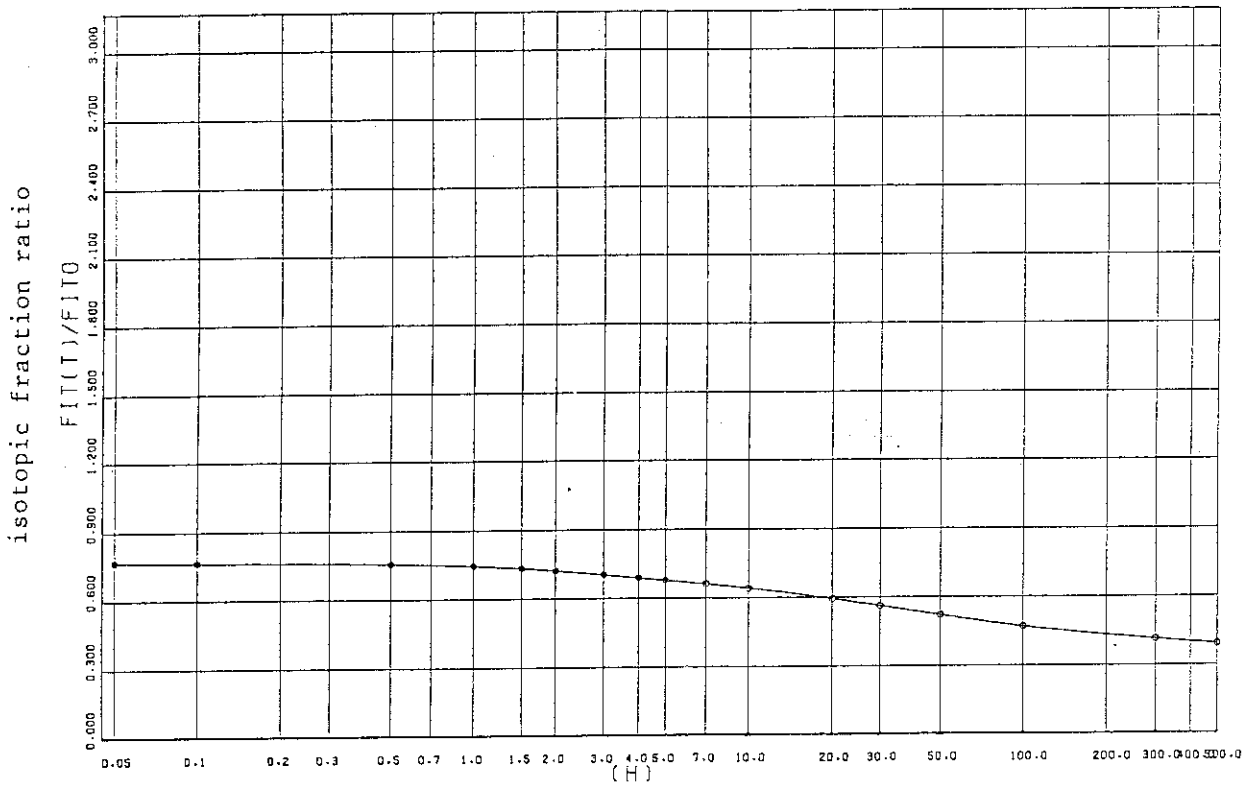


Fig. 52 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=10000

POWER=25%

DAY=1

ISOTOPE=KR,XE

○=KR83M

△=KR85

+ =KR85M

×=KR87

◇=KR88

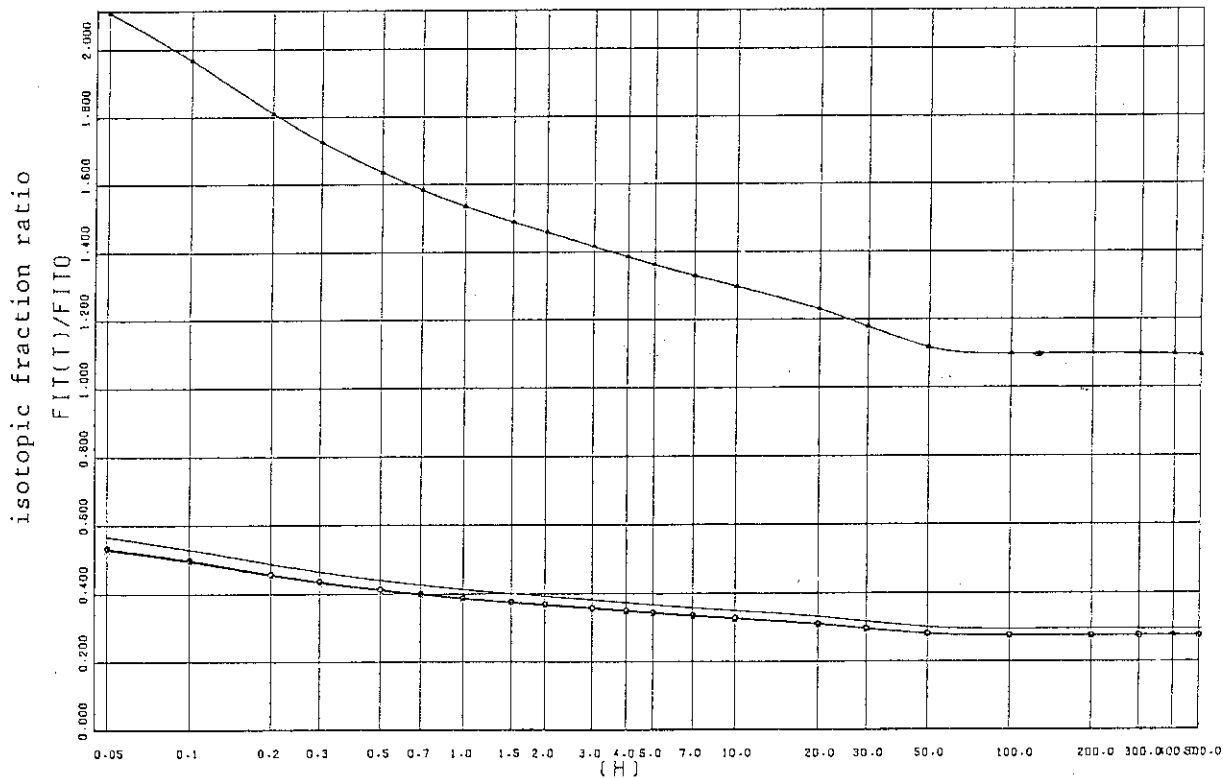


Fig. 53 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=10000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=KR89 △=KR90 + =XE131M X=XE133 ◇=XE133M

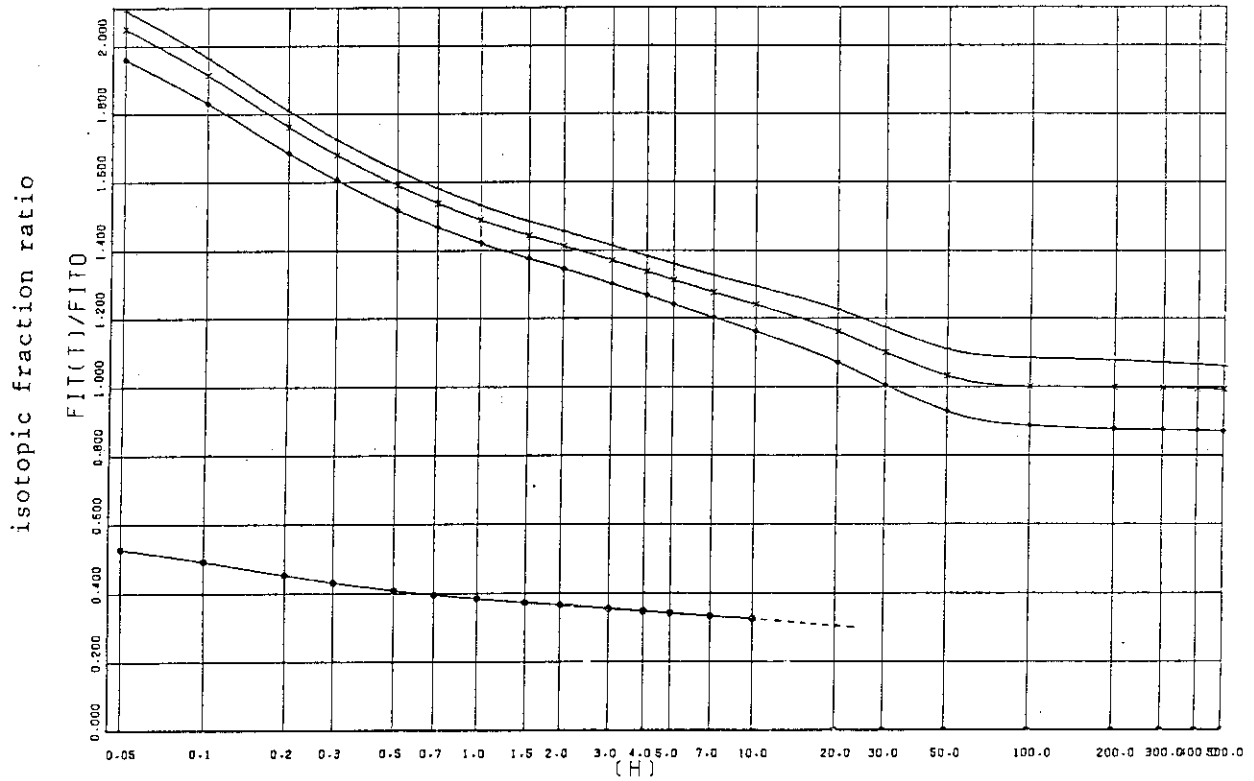


Fig. 54 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=10000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=KR,XE
 ○=XE135 △=XE135M + =XE137 X=XE138 ◇=XE139

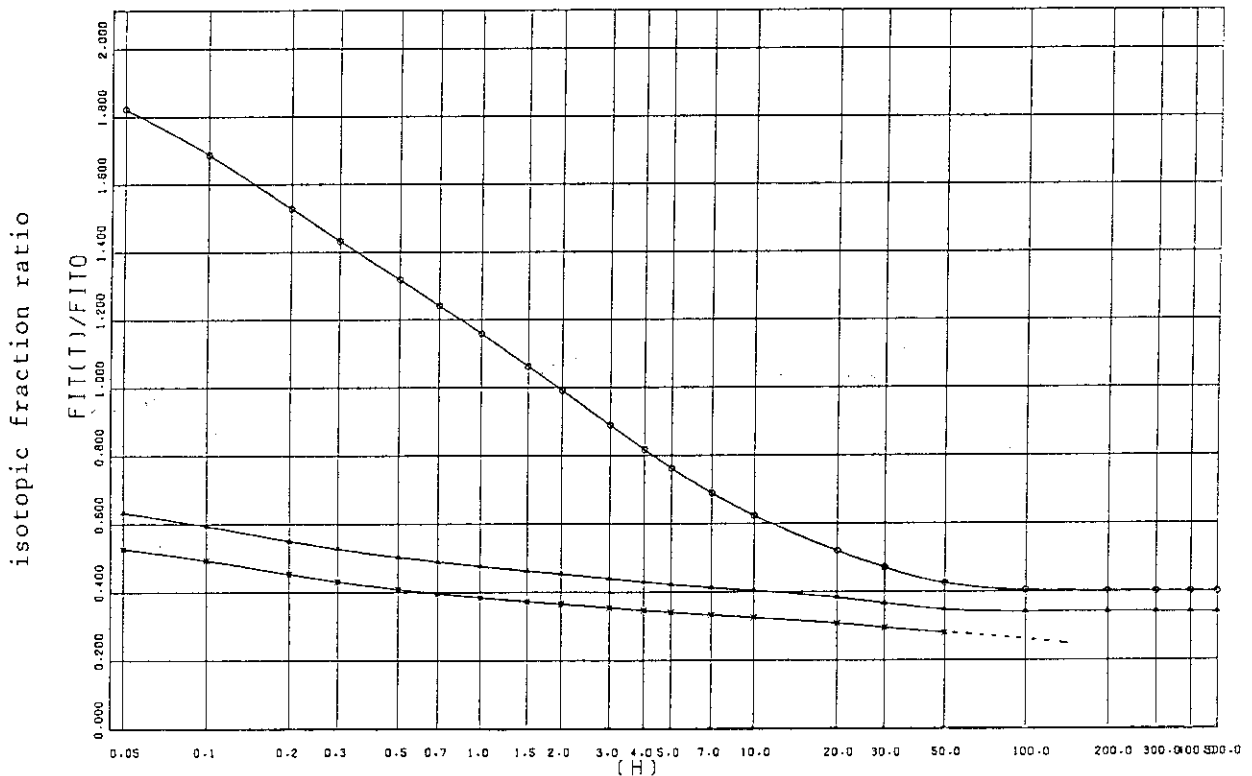


Fig. 55 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=10000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I129 △=I131 +=I132 X=I133 ◇=I134

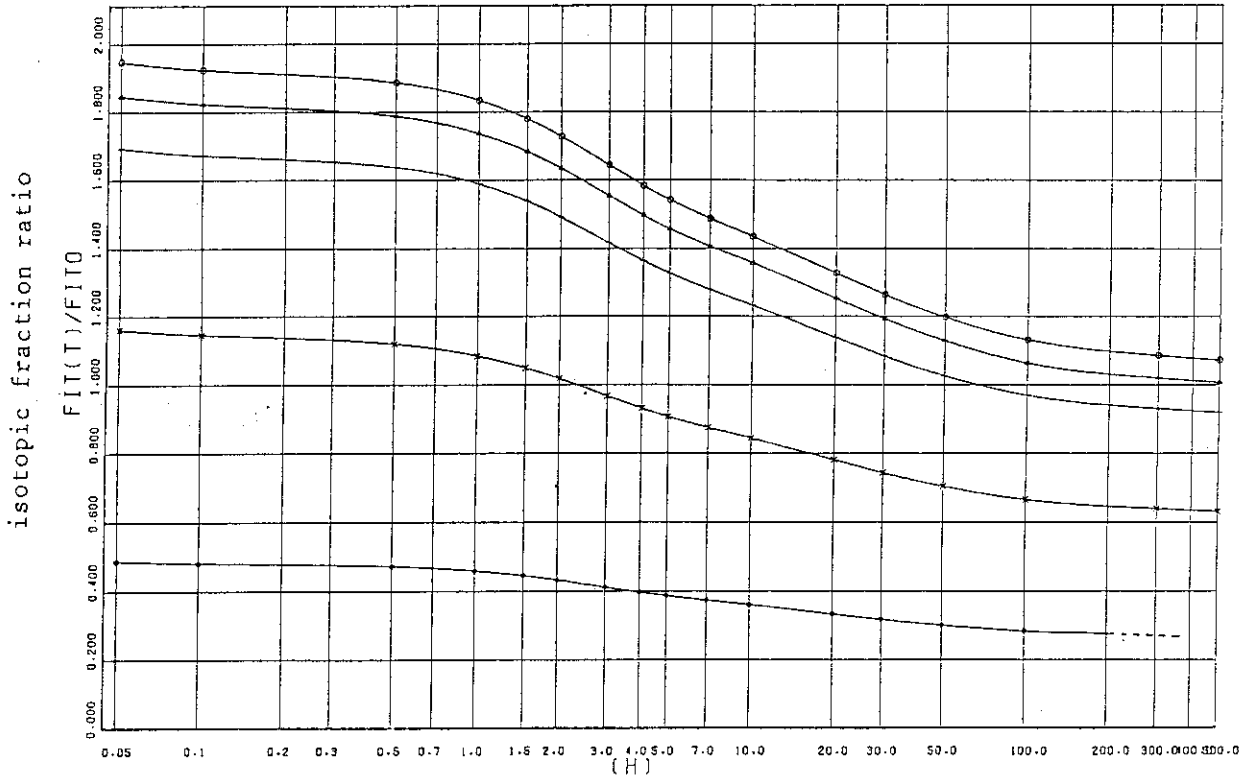


Fig. 56 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.

BURN-UP=10000 POWER=25% DAY=1 ISOTOPE=I
 ○=I135 △=I136

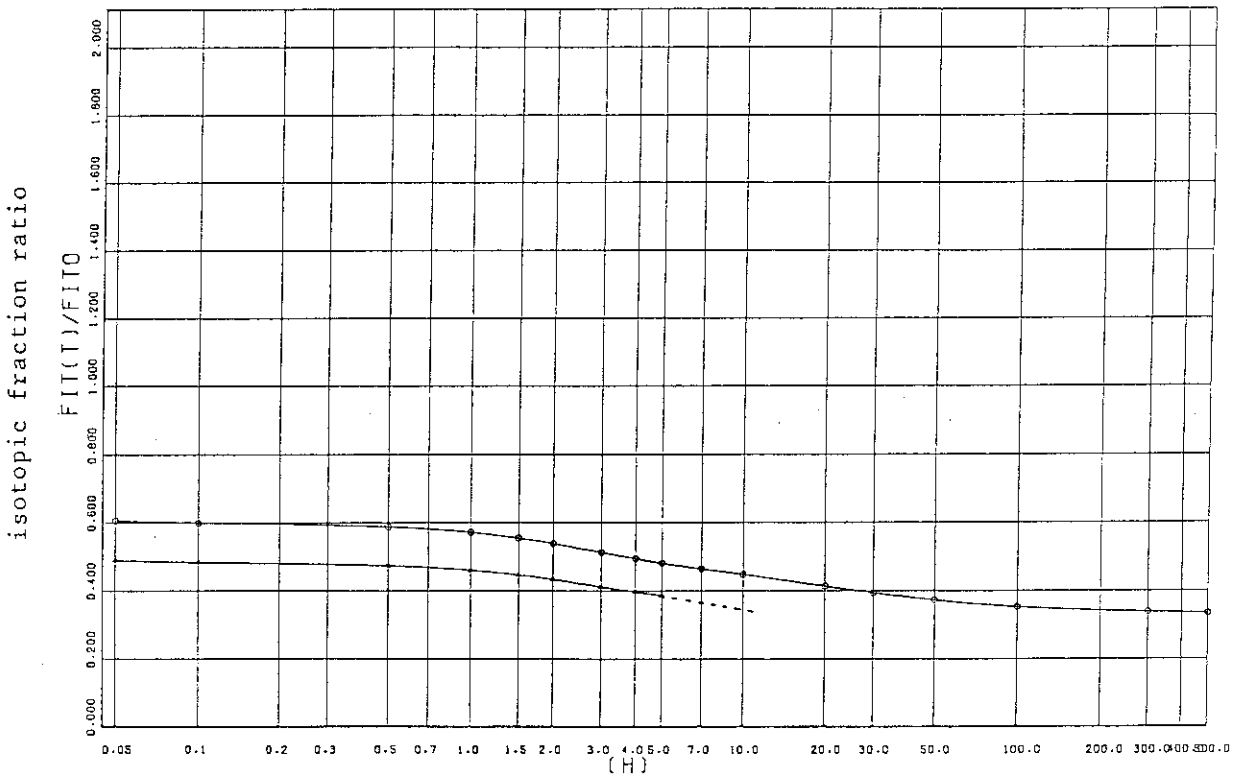


Fig. 57 Effect of variation of reactor output before shutdown on isotopic composition. The ratio shows the isotopic fraction to that in case of reactor shutdown immediately after its rated output operation.