

JAERI-Tech

99-043



JP9950407



## ハイブリッドK吸収端/蛍光X線濃度計の長期安定性

1999年5月

薗田 晓・富樫喜博・宮内正勝・岡崎修二\*

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

---

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

## ハイブリッドK吸収端/蛍光X線濃度計の長期安定性

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター安全試験部  
菌田 晓・富樫 喜博・宮内 正勝・岡崎修二\*

(1999年4月16日受理)

核物質の計量管理及び保障措置分析における溶液試料中のウランやプルトニウム濃度の測定は、一般に電位差滴定装置や質量分析装置等を使用した破壊分析法が適用されているが、保障措置にかかる検認の適時性の向上、分析の迅速性、分析済廃液の発生量の低減等の観点から、溶液試料に適用可能な高精度の非破壊分析法の確立が望まれている。原研では、米国DOEとの研究協力協定のもと、ハイブリッドK吸収端／蛍光X線濃度計を燃料サイクル安全工学研究施設(NUCEF)に設置し、溶液試料中のウラン及びプルトニウムの非破壊測定技術の共同開発を進めている。

本装置は NUCEF の査察機器として使用される予定である。このため本装置が、破壊分析法による測定結果と同等の測定精度を持ち、長期に安定した測定ができなければならない。更に、査察官が本装置を使用する場合、標準試料を用いた装置の健全性の確認が行われるため、長期にわたり安定した標準試料が必要となる。

本報告書は、ハイブリッドK吸収端／蛍光X線濃度計の長期安定性試験及び試作したウラン標準試料の長期安定性試験、さらに、試験をとおして得られたX線管の出力電圧変動が測定結果に与える影響についてまとめたものである。

Long-term Stability of Hybrid K-edge/K-XRF Densitometer

Takashi SONODA, Yoshihiro TOGASHI, Masakatsu MIYAUCHI and Shuji OKAZAKI\*

Department of Safety Research Technical Support  
Nuclear Safety Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 16, 1999)

Destructive assay methods such as potentiometric titration and mass spectrometry have been generally applied to the analyses of uranium and plutonium concentration in a solution sample for the purpose of the accountancy and safeguards for nuclear materials in a facility. Recently, it has been strongly expected to establish a non-destructive assay instead of the destructive assay from the viewpoints of the timeliness requirement for safeguards, the speed-up for the analysis and the decrease of quantity of liquid waste arising from the analysis.

For these purposes, a hybrid K-edge /K-XRF densitometer was installed in the Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility (NUCEF) of the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) under the JAERI-U.S. DOE cooperation program. JAERI has developed the techniques on the non-destructive assay of uranium and plutonium in cooperation with U.S. DOE.

This instrument is expected to be also applied to an inspection at NUCEF in the future. It is necessary to make sure that the instrument can analyze with the same accuracy compared with the destructive assay instrument and can keep the stable measurement over a long term for that purpose.

Furthermore, whenever an inspector uses the instrument the performance of the system will be first checked with the standard material whose concentration is known. Facility's side must prepare the standard material which is steady over a long time for that purpose.

---

\*Nuclear Material Control Center

This report presents the long-term stability of the instrument and uranium standard material and the effect of change of X-ray tube voltage on uranium concentration measurement.

**Keywords:** NUCEF, NDA, Non Destructive Assay, Uranium, Analysis, Assay, Safeguards, Accountancy, K-edge, XRF, X-ray, Measurement

This is a blank page.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.HKEDの概要及び測定原理 .....	2
3.HKEDの長期安定性 .....	3
3.1 試験方法 .....	3
3.2 試験結果 .....	3
4.密封試料の長期安定性 .....	3
4.1 密封試料の調製および試験方法 .....	3
4.2 試験結果 .....	3
5.X線管の出力電圧の変動が測定結果に与える影響 .....	4
5.1 K吸収端解析手法 .....	4
5.2 ウラン溶液測定試験及び結果 .....	4
5.3 ウラン濃度誤差の発生原因 .....	5
6.まとめ .....	6
謝 辞 .....	6
参考文献 .....	7

**Contents**

1. Introduction .....	1
2. Outline of HKED .....	2
3. Long-term Stability of HKED Instrument .....	3
3.1 Experimental Method .....	3
3.2 Result .....	3
4. Long-term Stability of Sealed Uranium Solution .....	3
4.1 Preparation and Experimental Method .....	3
4.2 Result .....	3
5. Effect of Change of X-ray Tube Voltage on Uranium Concentration .....	4
5.1 Technique of K-edge Jump Analysis .....	4
5.2 Experimental Method .....	4
5.3 Cause for Error of Uranium Concentration .....	5
6. Conclusions .....	6
Acknowledgments .....	6
References .....	7

## 1.はじめに

原研・米国 DOE 保障措置関連技術の研究協力協定のもと、1994 年 1 月にハイブリッド K 吸収端／蛍光 X 線濃度計<sup>①</sup> (Hybrid K-Edge/K-XRF Densitometer:以下「HKED」と言う) が NUCEF の分析室 (I) に設置された (Fig.1)<sup>②</sup>。

HKED は測定が容易な非破壊測定装置で、臨界実験装置 STACY 及び TRACY<sup>③,④</sup>の実験解析、核燃料調製設備<sup>⑤</sup>等の工程管理及び核燃料物質の計量管理に用いるが、更に HKED は、IAEA 及び国による保障措置の適時性及び効率化の観点から、NUCEF 施設内の査察機器としても適用する予定になっている。

従来、NUCEF では、査察の目的元素であるウランの分析に、自動電位差滴定装置<sup>⑥,⑦</sup>による Davies & Gray 法<sup>⑧,⑨</sup>を用いている。Davies & Gray 法は世界的にも実績のあるウラン分析方法で、測定精度が非常に良い反面、破壊測定法であるため試料の前処理が必要なこと、滴定液の調製が必要なこと、操作に熟練を要すること及び放射性廃液が発生することなどの欠点をもっている。今後の測定試料の増大に対処するため分析の迅速化、廃棄物発生量の低減化の観点から、分析の一部を早期に非破壊分析法である HKED で代替することが望まれている。

一方、HKED を査察機器として用いるためには、IAEA の認証をうけなければならない。そのためには、HKED による測定結果が、長期間にわたり破壊分析法と同等の測定精度を有していること、さらに、IAEA の査察官が HKED を使用する場合に必要となる装置の健全性をモニターするための長期にわたり性状が安定した標準試料の確保が必要になる。

さて、本来 HKED は、透過 X 線スペクトルの K 吸収端からウラン濃度を、そのウラン濃度、および、ウランとプルトニウムの XRF スペクトルからプルトニウム濃度を評価するものであるが、現在 NUCEF の原子炉施設はプルトニウムの使用に向け準備を進めているところであり、今回は、ウランを用いた K 吸収端濃度測定を行った。

本報告書は、HKED を査察機器として使用するために、HKED の長期安定性試験及び試作した標準試料の長期安定性試験、さらに、試験をとおして考察された X 線管の出力電圧変動が測定結果に与える影響をウラン溶液の分析に関してまとめたものである。

## 2.HKED の概要及び測定原理

ウラン、プルトニウム等の質量の重い元素に連続X線を照射すると、Fig.2.1 に示すように、透過X線スペクトル上のK吸収端エネルギーにおいて、濃度に依存したX線吸収段差（以下「K吸収端段差」という）が測定され、蛍光X線スペクトル上に Fig.2.2 に示す特性X線が測定される。

K吸収端測定は比較的濃度の高い試料の定量に優れた分析精度をもち、蛍光X線測定は試料形状に影響されやすいが低濃度の試料に優れた感度の測定が行える。HKED は、Fig.2.3 に示すように、試料に照射したX線ビーム軸上に配置されたK吸収端検出器と、ビーム軸と 150 度の角度で配置された蛍光X線検出器から構成される。K吸収端測定によってウラン等の多量に存在する元素濃度を定量し、蛍光X線測定によりウラン、プルトニウム等の目的元素の存在比を求めることにより、数種類の目的元素を同時定量できる非破壊分析装置である。

K吸収端測定を実施して得られた K吸収端スペクトルより、目的元素濃度  $\rho$  は次式で計算される<sup>10)</sup>。

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{1}{\Delta\mu \cdot d} \ln \left( \frac{T_u}{T_l} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta\mu \cdot d} \left[ \ln \left( \frac{1}{T_u} \right) - \ln \left( \frac{1}{T_l} \right) \right]\end{aligned}\quad (1)$$

ここで

$\Delta\mu$  : K吸収端前後の質量吸収係数の差 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$d$  : 試料溶液の厚さ(cm)

$T_l$  : K吸収端エネルギー下側(E-点)でのX線透過率

$T_u$  : K吸収端エネルギー上側(E+点)でのX線透過率

式(1) 中  $\Delta\mu$  は、標準試料を用いて測定することによって定まる校正定数であり、X線透過率  $T_l$  及び  $T_u$  は、試料の透過X線スペクトルをブランク試料(2 N-HNO<sub>3</sub>)の透過X線スペクトル（以下、「レファレンススペクトル」という）で除して得られる。

また、レファレンススペクトルは、通常 1000sec 程度で行われている試料の測定より長い 10000sec の時間をかけて測定され、数ヶ月に一度の頻度で更新されるよう管理している。

また、

$\ln \left( \frac{1}{T_u} \right) - \ln \left( \frac{1}{T_l} \right)$  を改めて K とおきこれを K吸収端段差の大きさとすると

式(1)は

$$\therefore \rho = \frac{1}{\Delta\mu \cdot d} \cdot K \quad (2)$$

となり、K吸収端段差の大きさ K を測定すれば、目的元素濃度が算出できる。

### 3.HKED の長期安定性

#### 3.1 試験方法

前報<sup>2)</sup>に引き続きおよそ 2 年間にわたり、STACY 及び TRACY の臨界実験に伴う分析試料(50 gU/lit.~450 gU/lit.)のウラン濃度を HKED で測定し、Davies & Gray 法による滴定分析結果と比較・検討し、HKED の長期安定性を調べた。なお、ウランの滴定に用いるニクロム酸カリウム標準溶液は標準金属ウラン(JAERI-U4)<sup>11)</sup>を用いて値付けされており、このニクロム酸カリウム標準溶液を使用した滴定分析によるウラン濃度の誤差は±0.3%と評価される。

分析試料はいずれも、光路長 2cm の Hellma 社製光学ガラスセル（容量：7ml）（以下、「セル」という）に溶液試料を 5~6ml 入れて測定を行った。

なお試験期間中適当な頻度で、滴定分析で値付けされたウラン溶液を用いての校正定数△μの変更、レファレンススペクトルの測定および X 線管の取り外し、取り付けを実施しているほか、途中、ソフトウェアの変更を行った。

#### 3.2 試験結果

Fig.3 に、横軸に測定日を、縦軸に滴定装置によるウラン濃度( $\rho_T$ )に対する HKED によるウラン濃度( $\rho_H$ )の比( $\rho_H/\rho_T$ )をとった測定結果を示す。Fig.3 の誤差棒は、滴定装置及び HKED によるウラン濃度の測定誤差から評価された誤差 0.4%である。各データの誤差を考慮し、 $\rho_H/\rho_T$ の経時変化から判断すると、HKED と滴定によるウラン濃度の比は前報の結果も合わせれば、およそ 3 年間にわたって、 $0.9981 \pm 0.0026$  と安定した結果が得られた。今回の試験から、HKED は定期的にレファレンススペクトルの測定等を行うことにより、長期にわたり安定した測定結果が得られることが分かった。

### 4. 密封試料の長期安定性

#### 4.1 密封試料の調製および試験方法

ウラン標準試料として約 120gU/lit.及び約 310gU/lit.の硝酸ウラニル溶液約 5ml をセルに入れ、四フッ化エチレン製の栓をし、栓の周りをエポキシ樹脂で固め密封した試料（以下「密封試料」という）を作成した(Fig.4.1)。この密封試料を年平均室温 25°C 及び相対湿度約 50% の安定した雰囲気の室内に長期間保管し、適当な頻度で HKED を使用して測定を行い、密封試料の長期安定性試験を行った。

なお、測定時間は 1000sec、くり返し測定回数は 3 回である。

#### 4.2 試験結果

Fig.4.2 及び Fig.4.3 に、120gU/lit.密封試料及び 310gU/lit.密封試料を用いて得られた、横軸に測定日を、縦軸にウラン濃度とその標準偏差をとった測定結果を示す。

いずれの密封試料とも時間の経過と共にウラン濃度の上昇が見られ、濃度上昇は 120gU/lit.溶液で年約 0.3gU/lit.、310gU/lit.溶液で年約 0.9gU/lit.となっている。ウラン濃度の上昇の原因と

して、密封試料の不安定性と HKED の不安定性が考えられる。しかし、前章の試験で HKED は長期にわたり安定していることが明らかのことから、今回のウランの濃度上昇はセルの気密が長期にわたり確保されなかつたことによる水の蒸発が原因と考えられる。

本試験の結果、長期にわたりウラン濃度が変化しないようエポキシ樹脂で栓を完全に密封するのは難しいことが分かった。今後、密封方法の改良、固体試料の検討等が必要である。

## 5. X線管の出力電圧の変動が測定結果に与える影響

### 5.1 K吸収端解析手法<sup>1)</sup>

K吸収端段差の大きさ  $K$  を測定するために、測定スペクトル(Fig.5.2)は、最初にK吸収端前後の入射光子数を把握し、測定対象元素以外の共存元素、装置の構成材料、X線管の出力特性、半導体検出器の特性等の影響を排除するために、測定対象元素を含まないプランク試料を用いて測定されたレファレンススペクトル(Fig.5.1)で除して、透過率( $T$ )を求めた後、縦軸を  $1/T$  にしてプロットする(Fig.5.3)。

その後、規格化したスペクトルの縦軸を対数座標に変更しK吸収端段差(Fig.5.4)の大きさを求める。

ところで、Ge 検出器は固有の分解能をもっているためK吸収端段差は急激に立ちあがることなく、ショルダーをもった段差として観察される。

そのため、Fig.5.5 に示すとおり、スケール変更後、K吸収端両側のデータを直線近似し、近似直線より算出された近似領域の端  $E^-$ 、 $E^+$  点での  $\text{Exp}(\ln\ln(1/T))$  の差を K吸収端段差の大きさとして計算している（内挿法）。ここで、 $\text{Exp}(\ln\ln(1/T))$  は、解析プロセスにおいて  $\ln\ln(1/T)$  を直線近似した値の  $\text{Exp}$  を計算したものである。解析法には、近似直線を K吸収端のエネルギーまで外挿して K端の大きさを近似する計算法（外挿法）もあるが、通常内挿法を使用している。

さて、測定スペクトルの規格化を行う場合、測定スペクトルとレファレンススペクトルはできるだけ同じ条件で測定されなければならない。X線発生装置の出力電圧の保証値は設定印加電圧に対して ±1% であり、150kV の設定印加電圧に対して 1.5kV の変動に相当する。

経験上、実際の出力電圧には 0.5kV 以内の変動があり、このわずかな変動がウラン濃度計算結果に影響がでる可能性が予想される。

このため、X線管の出力電圧変動の影響について調べるために、次のような試験を行った。

### 5.2 ウラン溶液測定試験及び結果

レファレンススペクトルを設定印加電圧 150kV、測定時間 10000sec で 1 回測定し、123gU/lit. および 357gU/lit. のウラン溶液を 145~155kV まで設定印加電圧を変えて測定時間 1000sec で 3 回測定を行った。Fig.5.6 及び Fig.5.7 に測定結果を示す。

いずれの濃度のウラン溶液でも、レファレンススペクトル測定時の設定印加電圧に対し、測定スペクトル測定時の設定印加電圧が小さくなるとウラン濃度は大きく評価され、逆に設定印加電圧が大きくなるとウラン濃度は小さく評価されることが分かった。

### 5.3 ウラン濃度誤差の発生原因

前述したように、出力電圧の変動がウラン濃度の測定結果に微妙な変動を及ぼすことが分かった。ここではこの原因を探るため、次のような試験を行った。

まず出力電圧 150kV でブランク溶液(2N-硝酸溶液)のレファレンススペクトルを 10000sec で測定し、次に、このブランク溶液をウラン濃度が 0gU/lit.の試料溶液と考え、出力電圧を 145, 150, 155kV と変えて試料スペクトルを 1000sec で測定した。Fig.5.8 に測定されたスペクトルを示す。出力電圧が高くなるにつれて、X 線スペクトルの最大エネルギーが大きくなり、更に K 吸収端付近のスペクトルの勾配が大きくなっているのが分かる。

Fig.5.9 に試料スペクトルとレファレンススペクトルから計算されるウランの K 吸収端近傍での透過率の逆数を、横軸に  $\ln E$ 、縦軸に  $\ln \ln(1/T)$  をとった測定結果を示す。いずれのスペクトルでもウランは含まれていないので、当然 K 吸収端段差は観察されない。しかし、Fig.5.9 のスペクトルについて内挿法により K 吸収端段差の大きさを求める場合、K 吸収端両側の黒丸で示したデータセットを最小二乗法で直線近似する。そして、両直線でエネルギー  $E$ -及び  $E+$ における  $\ln \ln(1/T)$  の値を  $L_1$  及び  $L_2$  とすると、出力電圧が 145kV 及び 155kV で得られたスペクトルでは Fig.5.9 に示すとおり、 $L_1$  と  $L_2$  の間に差が生じる。その結果、試料はウランを含まないにもかかわらず両スペクトルには、 $L_1(145)-L_2(145)=\Delta K_1$  及び  $L_1(155)-L_2(155)=\Delta K_2$  の擬 K 吸収端段差が発生することになり、ウラン濃度として評価されてしまう。

実際にはウランを含む試料スペクトルを測定した場合、ウランによる真の K 吸収端段差にこの擬 K 吸収端段差が加算されることになり、正確な K 吸収端段差が評価されないことになる。

Fig.5.10 は、ウランを含む試料スペクトルの真の K 吸収端段差に擬 K 吸収端段差を重ねたスペクトルを想定したものである。このことから、出力電圧が 145kV で測定された試料スペクトルの K 吸収端段差の大きさは  $K+\Delta K_1$  と過大に評価され、逆に 155kV では  $K-\Delta K_2$  と過小に評価されることになり、これは、Fig.5.1、Fig.5.2 に示す出力電圧が増えると測定結果は減るという結果と一致する。

また、K 吸収端段差の大きさ  $K$  はウラン濃度に比例するが、擬 K 吸収端段差  $\Delta K$  は出力電圧の変動によって発生するものなのでウラン濃度には無関係な値となる。例えば、100gU/lit.のウラン溶液を測定したとき 1gU/lit.に相当する擬 K 吸収端段差  $\Delta K$  が発生したら、測定値は 101gU/lit.となり 1%の誤差となる、同条件で 300gU/lit.のウラン溶液を測定すると 301gU/lit.と測定され、分析誤差は 0.33%となる。このように、同一の出力電圧変動でも、高濃度試料を測定すると影響が低濃度試料測定時より相対的に小さくなる。なお、Fig.5.6 及び Fig.5.7 から得られる電圧変動量に対するウラン濃度の変動量は 123gU/lit.溶液では 0.32gU/(lit. · kV)、357gU/lit.溶液では 0.25gU/(lit. · kV)とやや異なる結果が得られているが、測定結果は出力電圧変動以外の測定誤差も含まれているので変動量の違いは分析誤差によるものと考えられる。

ところで、HKED は Fig.5.8 に示すように測定スペクトルより X 線のカットオフ点を求ることによって X 線管の出力電圧をモニタしている。通常、設定電圧に対し出力電圧が  $\pm 0.5$ kV の範囲をこえて変動すると測定者に X 線出力電圧異常の警告を出すように設定されている。Fig.5.6 及び Fig.5.7 から 1kV 変動時の平均ウラン濃度変動を 0.30gU/(lit. · kV) とすると、0.5kV の変動で 0.15gU/lit.となる。HKED による分析誤差の目標を 0.3%以内とすれば、

50gU/lit.の試料溶液を測定する場合、警告がでると目標分析誤差を越えてしまうことになる。

このように低濃度試料溶液の測定時には、出力電圧変動による分析誤差が無視できなくなる。そのため、レファレンススペクトルの定期的な測定を実施し、レファレンススペクトルの出力電圧と試料スペクトルの出力電圧の間に有意な差が生じていないことを常に確認することが大切である。

## 6.まとめ

本試験の結果、次のことが明らかとなった。

- HKED によるウラン試料の濃度測定結果  $\rho_H$  は滴定分析法の結果  $\rho_T$  と比べて、およそ 3 年間にわたり、 $\rho_H/\rho_T$  が  $0.9981 \pm 0.0026$  と長期にわたり安定しており、HKED は定期的にレファレンススペクトルの測定等を行えば長期間安定した測定が可能であることが分かった。
- ガラスセルにエポキシ樹脂で密封した試料は 120gU/lit. 溶液で年約 0.3gU/lit.、310gU/lit. 溶液で年約 0.9gU/lit. と若干の蒸発傾向が見られるため、標準試料として使用するには密封方法を改良する、固体試料を使用する等の検討が必要である。
- X 線出力電圧のカットオフ点がレファレンススペクトルと試料スペクトルで 0.5kV 変動すると、NUCEF に設置された HKED では、約 0.15gU/lit. のバイアス誤差が発生することが確認できた。低濃度試料を HKED で測定する際には、誤差要因となるので、レファレンススペクトルを定期的に更新し、カットオフ点がレファレンススペクトルと試料スペクトルで有意な差がないことを確認することが必要である。

本試験の結果、HKED はウラン濃度分析に比較的高い精度で適用できることが確認できた。今後、HKED の大きな利点の一つであるプルトニウム等の同時定量に向けて、検討を進めていきたい。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、ウラン標準溶液の調製及び滴定装置によるウランの分析等でお世話になった試験計画課の方々に感謝いたします。また、新ソフトウェアのインストールにおいてお世話になり、HKED 全般にわたり貴重なアドバイスをいただいた米国ロスアラモス国立研究所の Hsue 氏、Collins 氏に感謝します。

なお、本研究の一部は、原研・米国 DOE 保障措置協定の活動計画(Action Sheet)に基づいて実施されたものである。

## 参考文献

- 1) Ottmar H. and Eberle H.: "The Hybrid K-Edge/K-XRF Densitometer: Principles-Design-Performance", KfK4590, (1991).
- 2) 峯尾英章、岡本久人、宮内正勝、岡崎修二、星勝哉、竹下功、Sin-Tao Hsue : "NUCEF ハイブリッド K 吸収端濃度計の整備", JAERI-Tech 96-033, (1996).
- 3) 村上清信、小野寺清二、他:"定常臨界実験装置(STACY)の製作", JAERI-Tech 98-033, (1998)
- 4) 竹下功、前田充、他:"NUCEF 計画 燃料サイクル安全工学研究の現状と今後の展開", 原子力工業, 43, 1(1997).
- 5) 杉川進、梅田幹、石仙順也、中崎正人、白橋浩一、松村達郎、田村裕、河合正雄、辻健一、館盛勝一、井沢直樹、野村正之:"燃料サイクル安全工学研究施設(NUCEF)燃料調製設備の概要(受託研究)", JAERI-Tech 97-007, (1997).
- 6) 宮内正勝、岡本久人、深谷洋行、坂爪克則、薗田暁、中尾智春、久保田政敏、新妻泰、園部保、岡崎修二 :"NUCEF 分析設備" JAERI-Tech 96-007, (1996).
- 7) 久保田政敏他:私信
- 8) Davies W. and Gray W.: "A Rapid and Specific Titrimetric Method for the Precise termination of Uranium Using Iron(II) Sulphate as Reductant", Talanta, 11, pp1203-1211(1964)
- 9) Eberle A.R., Lerner M.W., Goldback C.G. and Rodden C.J.: "Titrimetric Determination of Uranium in Product, Fuel, and Scrap Materials after Ferrous Ion Reduction in Phosphoric Acid. Part I. Manual Titration. Part II. Automatic Titration", NBL-252(1970).
- 10) S.-T. Hsue, M. Collins, R. Cole, J. Sprinkle, Jr, G. Walton, M. Miyauchi, H. Okamoto, S. Okazaki, "Hybrid Instrument Development for an Analytical Laboratory", LA-13179-MS(1996)
- 11) 橋谷 博、星野 昭、安達武雄:"純分定量用金属ウラン標準物質 JAERI-U4", JAERI-M 5343, (1973).

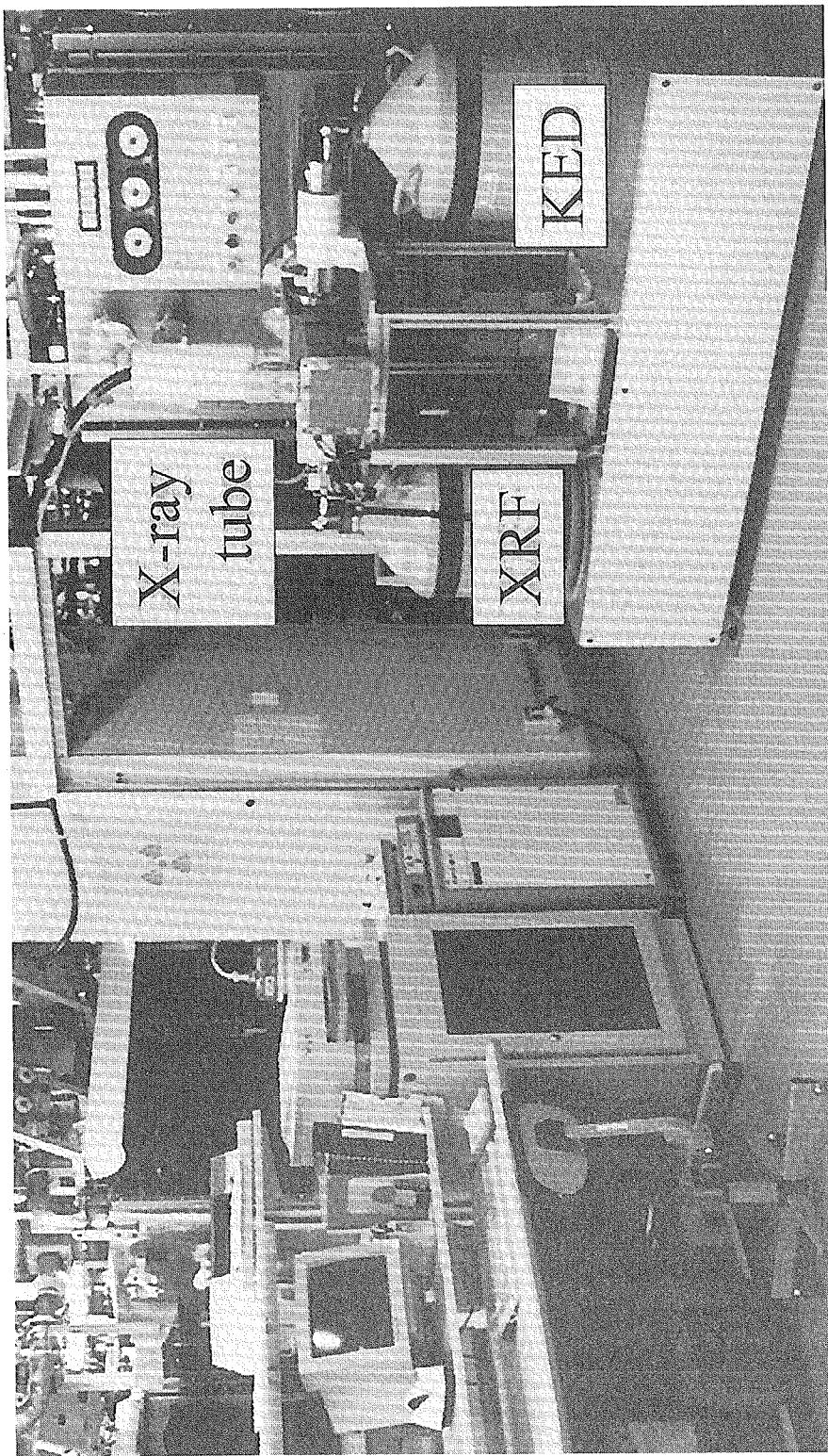


Fig.1 Hybrid KED/XRF instrument in NUCEF

KED:K-Edge Densitometry detector  
XRF:X-Ray Fluorescence detector

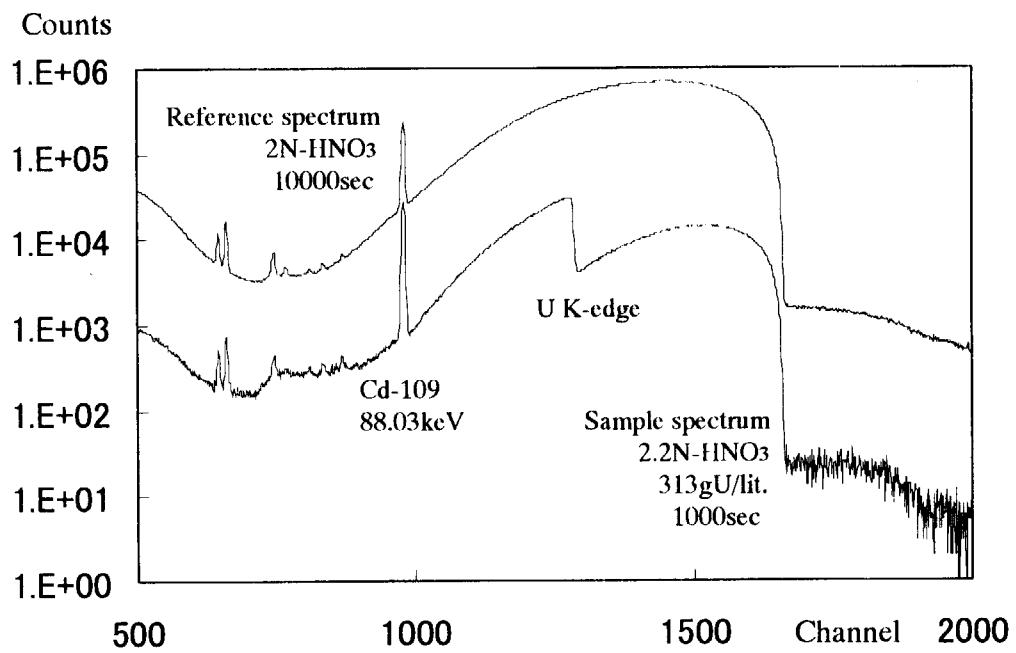


Fig.2.1 K-edge transmission spectrum from uranyl nitrate solution of STACY.

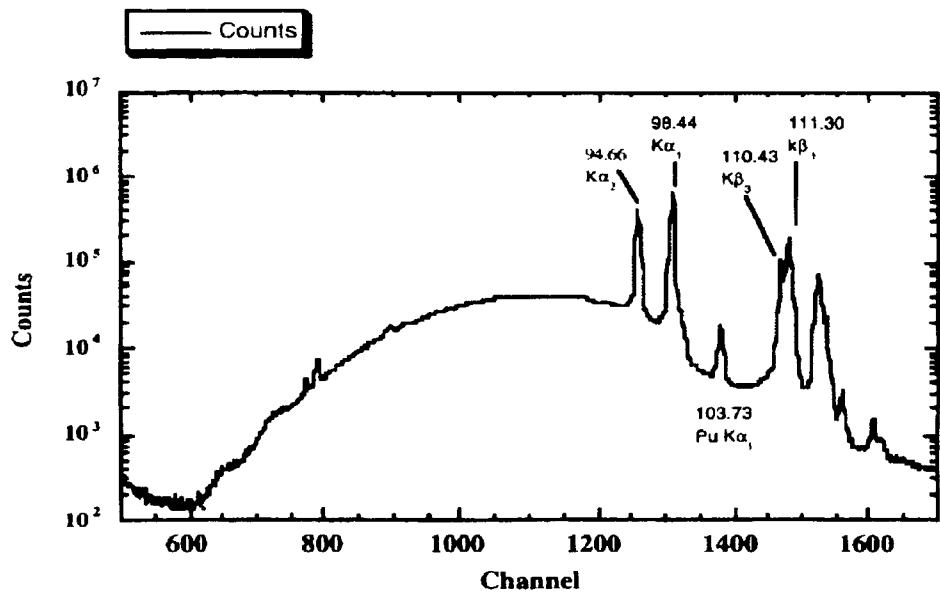


Fig.2.2 XRF spectrum from a sample containing a mixture of uranium and plutonium<sup>10)</sup>.

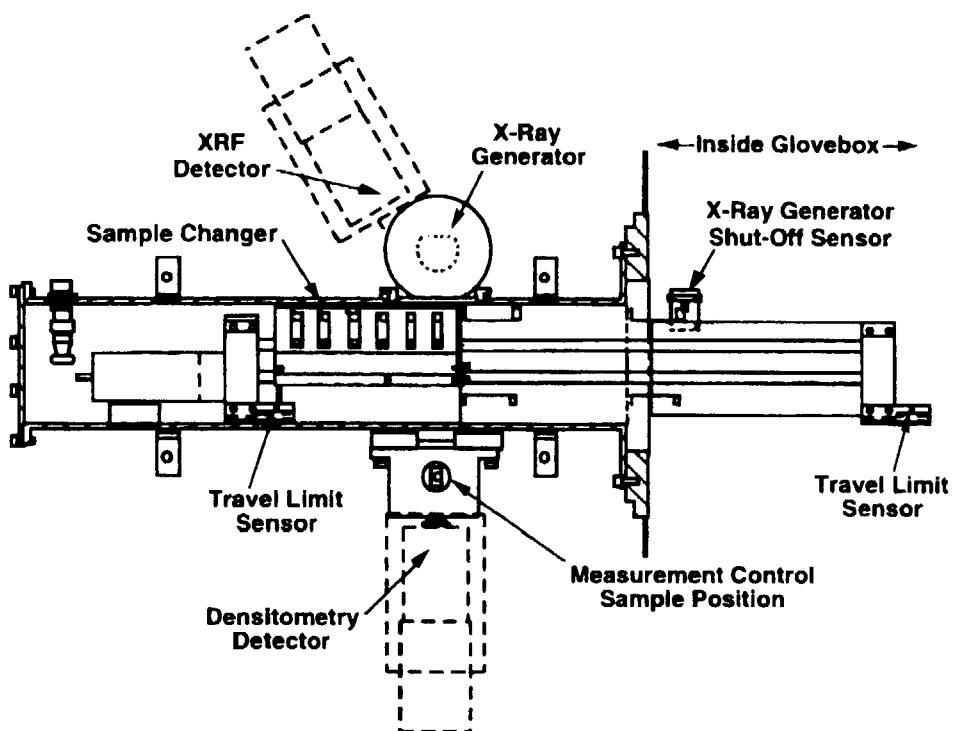


Fig.2.3 Top view of schematic design of hybrid KED/XEFhardware system.<sup>10)</sup>

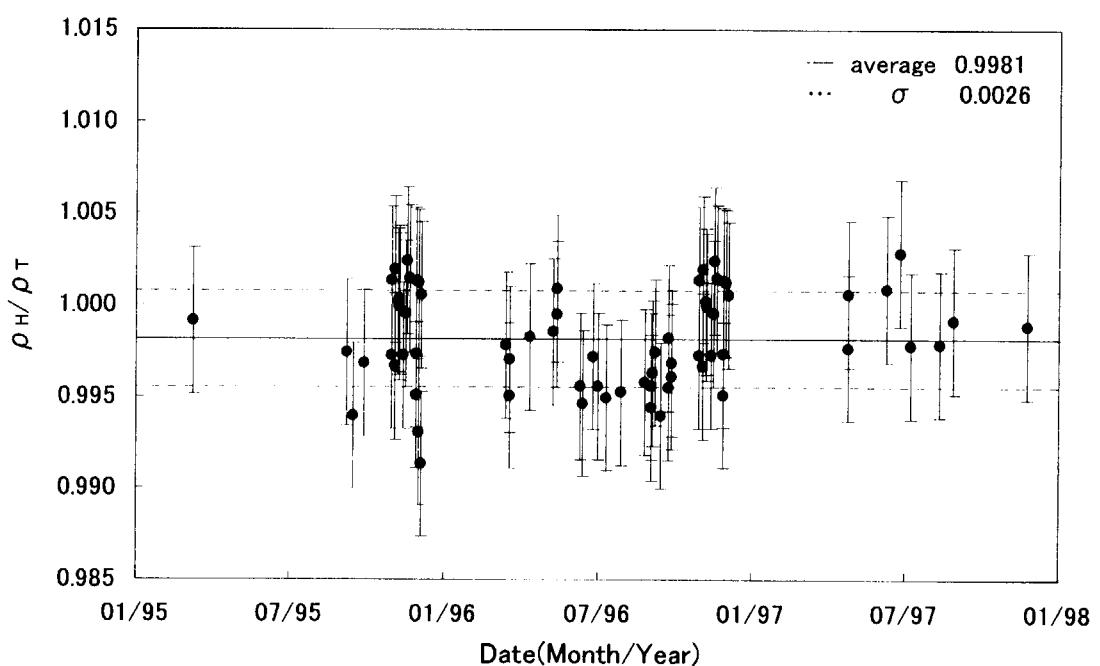


Fig.3 Long term stability of hybrid KED/XRF instrument

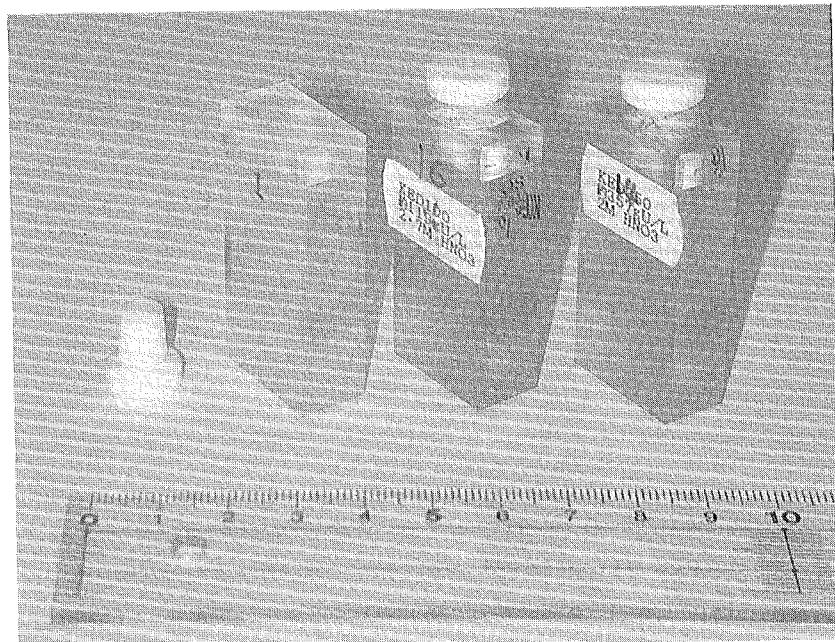


Fig.4.1 Sealed uranium sample

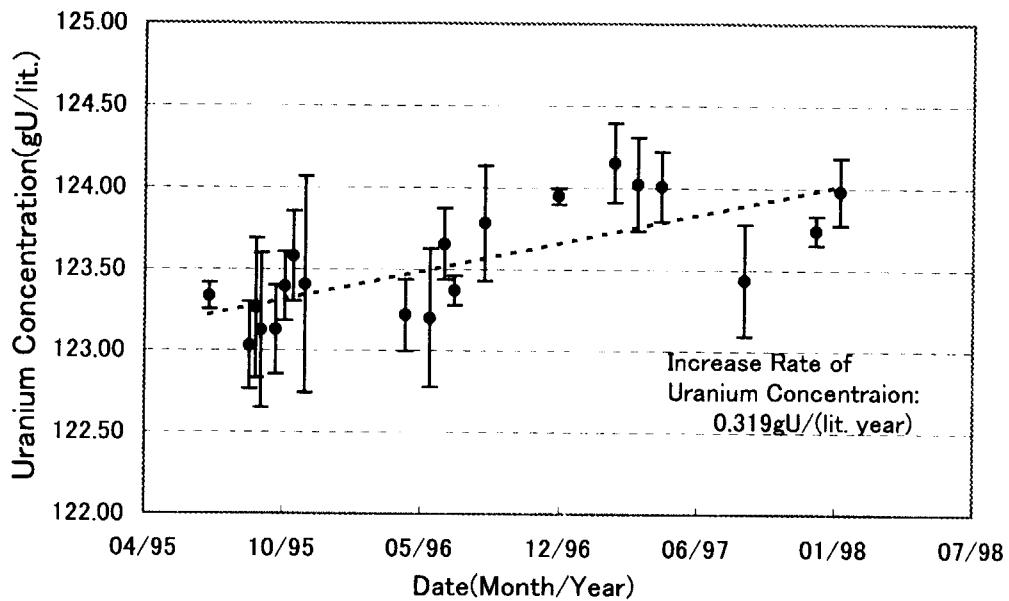


Fig.4.2 Long term stability of uranium standard solution with about 120gU/lit. concentration.

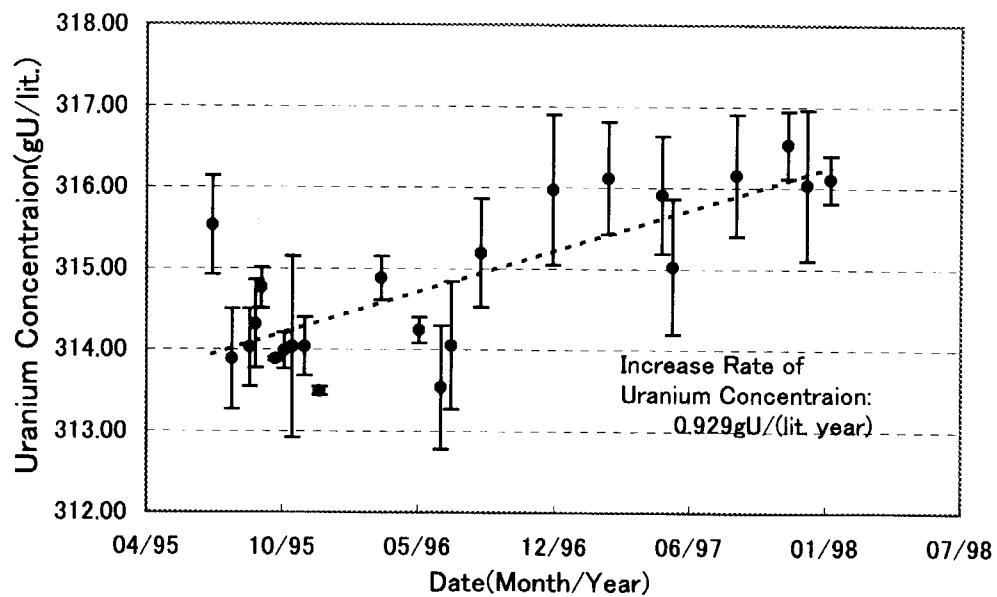
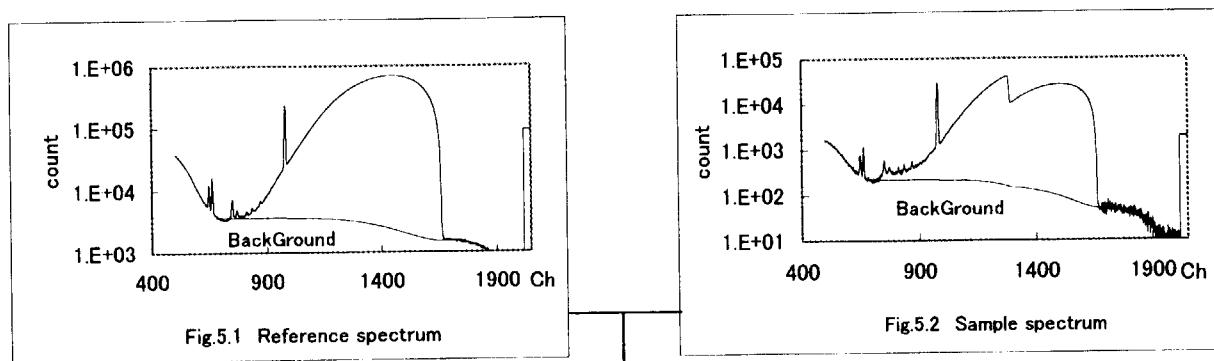
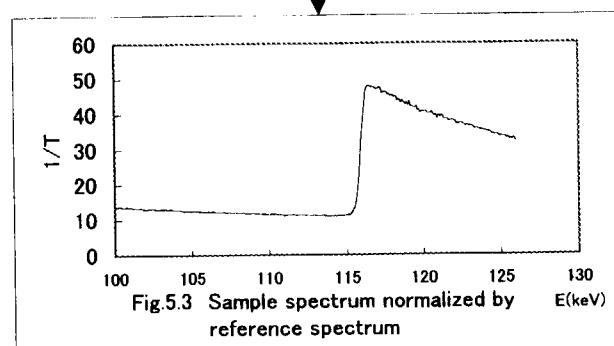
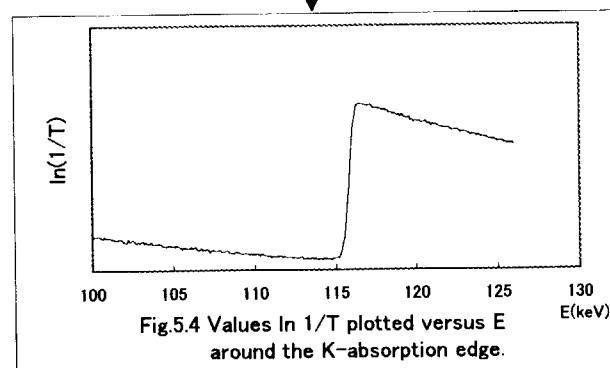


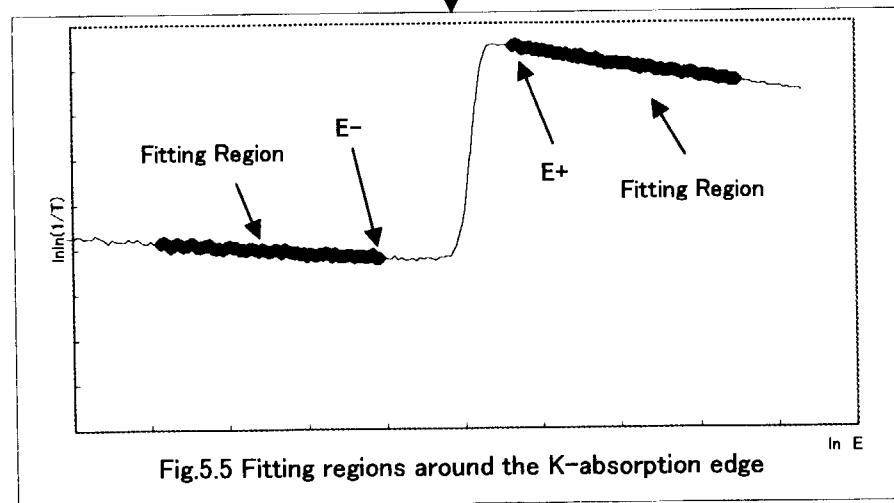
Fig.4.3 Long term stability of uranium standard solution with about 310gU/lit. concentration.

Calculation of inverse number of transmission rate( $T$ )

Change of vertical axis



Change of both axes



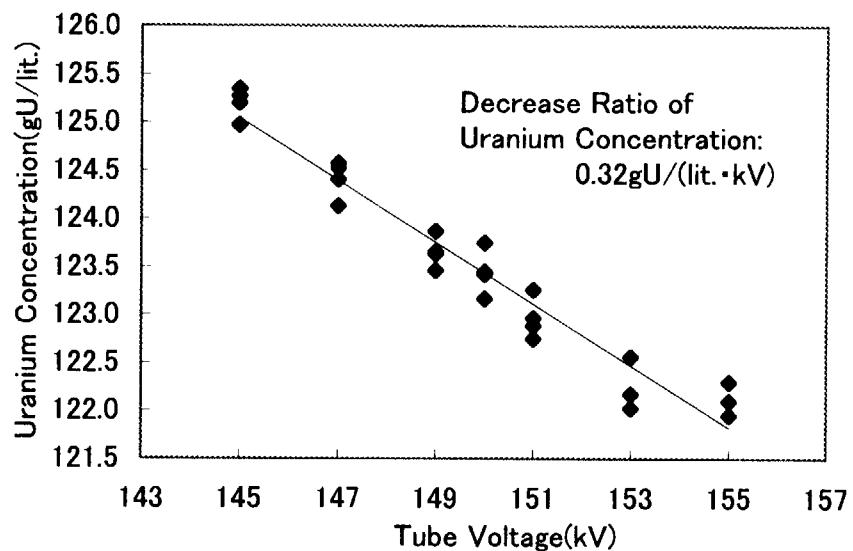


Fig.5.6 Effect of change of X-ray tube voltage on uranium concentration.  
(Assay Concentration: 123gU/lit.)

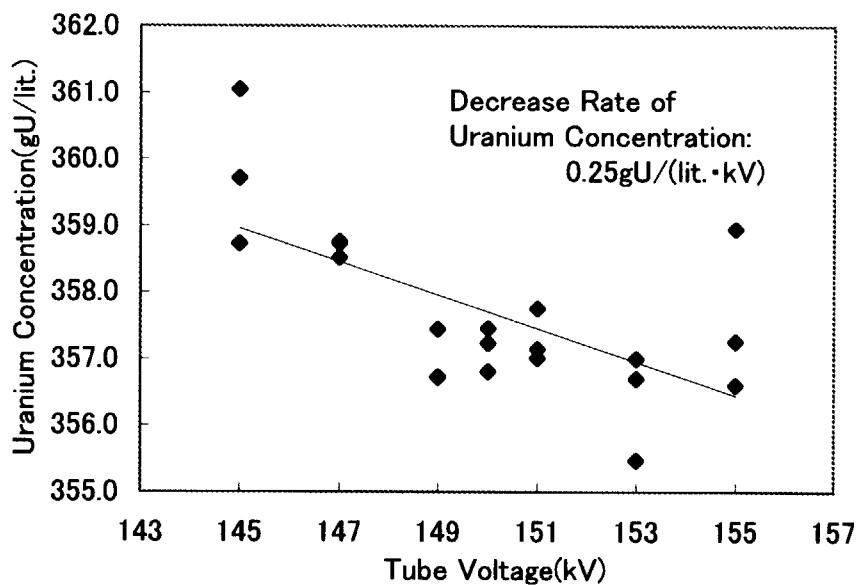


Fig.5.7 Effect of change of X-ray tube voltage on uranium concentration.  
(Assay concentration: 357gU/lit.)

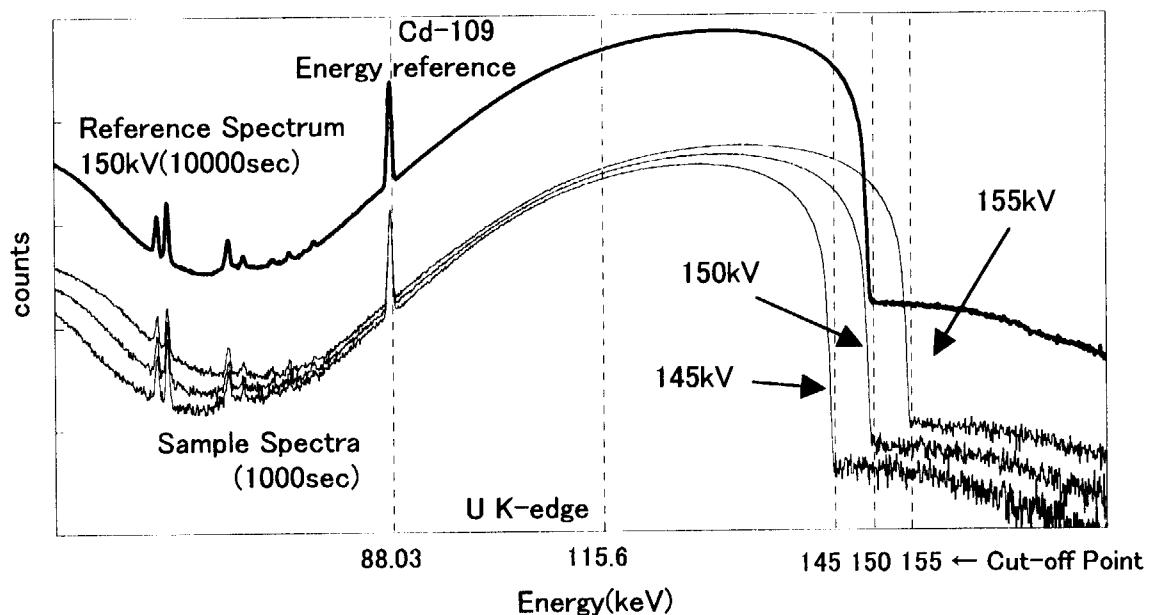


Fig.5.8 Sample and reference spectra from blank solution under different X-ray tube voltage.

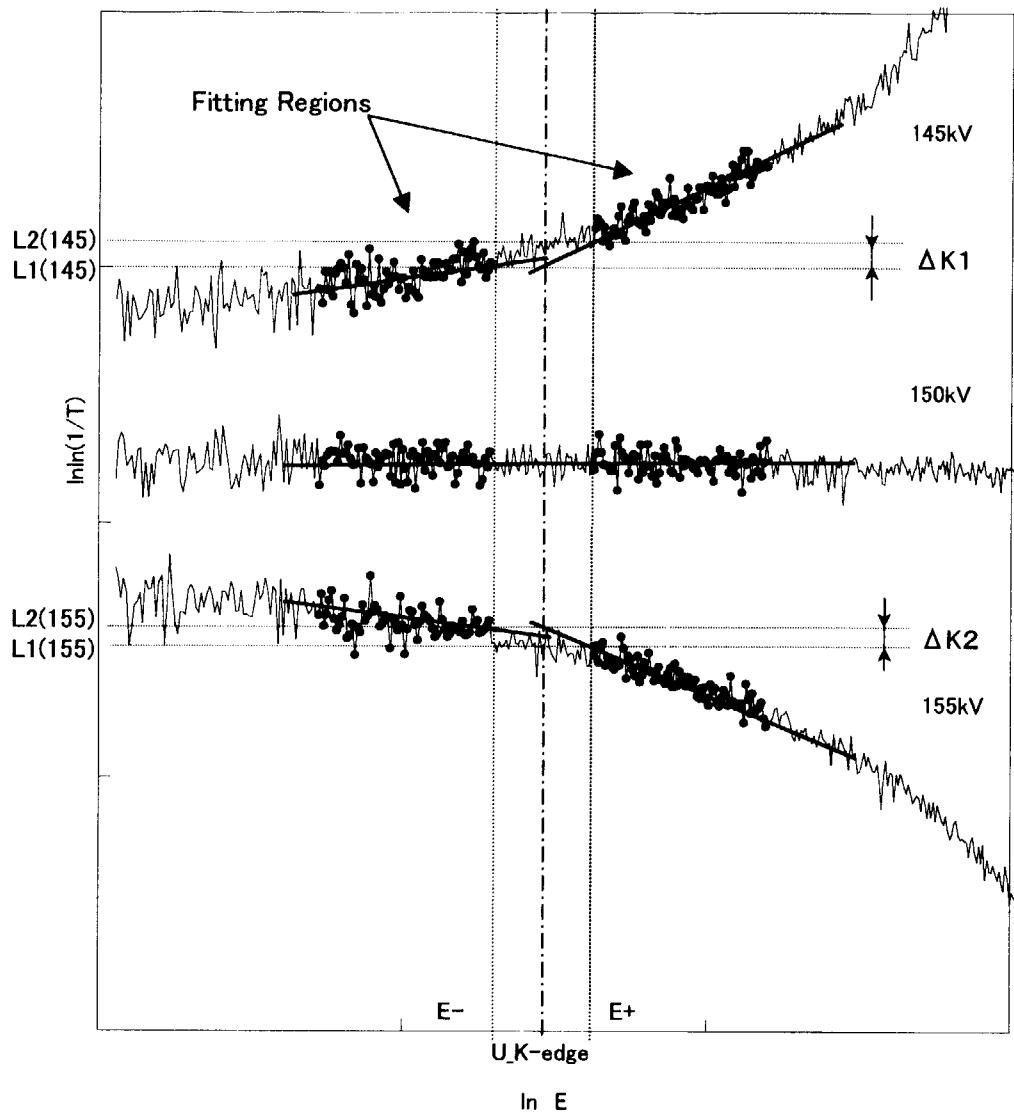


Fig.5.9 Generation of false K-edge jump on sample spectra from blank solution under different X-ray tube voltage.

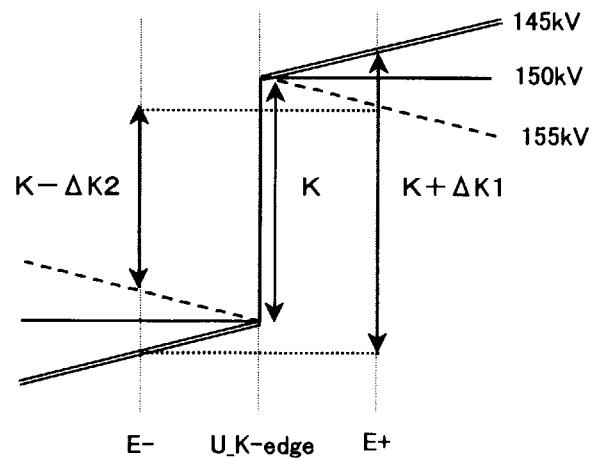


Fig.5.10 Shape of K-edge jump coupled with false K-edge jump on sample spectrum from uranium solution.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
工率、放熱束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	コット	W	J/s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	C/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC開催理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストーカス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	= 4.1855 J(15 °C)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>		= 4.1868 J(国際蒸気表)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>		
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-5</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-26</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

