

# 直流アーク放電発光分光法による MOX粉末中の 金属不純物元素の定量

—粉末試料直接定量のための標準添加法の適用—

Determination of Metal Impurities in MOX Powder

by Direct Current Arc Atomic Emission Spectroscopy

-Application of Standard Addition Method for Direct Analysis of Powder Sample-

古瀬 貴広 田口 茂郎 久野 剛彦 駿河谷 直樹

Takahiro FURUSE, Shigeo TAGUCHI, Takehiko KUNO and Naoki SURUGAYA

バックエンド研究開発部門

核燃料サイクル工学研究所

再処理技術開発センター

施設管理部

Technical Services Department

Tokai Reprocessing Technology Development Center

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

December 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

直流アーク放電発光分光法による MOX 粉末中の金属不純物元素の定量  
—粉末試料直接定量のための標準添加法の適用—

日本原子力研究開発機構  
バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所  
再処理技術開発センター 施設管理部

古瀬 貴広<sup>\*</sup>, 田口 茂郎, 久野 剛彦, 駿河谷 直樹

(2016 年 10 月 14 日受理)

使用済核燃料の再処理過程を経て得られた MOX (ウラン・プルトニウム混合酸化物) 粉末は、キャラクタリゼーションのために金属不純物元素の定量分析が必要となる。本分析には、粉末試料を溶解することなく直接定量が可能となる直流アーク放電発光分光法が有用とされるが、検量線を作成する際にマトリックスマッチングなどの問題を克服できる標準物質の選択が最も重要な課題であった。本報告では、試料マトリックスの影響を考慮して既知量の不純物金属を含む八酸化三ウランを標準物質として用いた標準添加法を適用することによって、試料中に有意量が含まれる鉄、クロム、ニッケルの定量を試み、良好な結果が得られることを明らかにした。

**Determination of Metal Impurities in MOX Powder  
by Direct Current Arc Atomic Emission Spectroscopy  
-Application of Standard Addition Method for Direct Analysis of Powder Sample-**

Takahiro FURUSE<sup>※</sup>, Shigeo TAGUCHI, Takehiko KUNO  
and Naoki SURUGAYA

Technical Services Department,  
Tokai Reprocessing Technology Development Center,  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 14, 2016)

Metal impurities in MOX powder obtained from uranium and plutonium recovered from reprocessing process of spent nuclear fuel have to be determined for its characterization. Direct current arc atomic emission spectroscopy (DCA-AES) is one of the useful methods for direct analysis of powder sample without dissolving the analyte into aqueous solution. However, the selection of standard material, which can overcome concerns such as matrix matching, is quite important to create adequate calibration curves for DCA-AES. In this study, we apply standard addition method using the certified  $U_3O_8$  containing known amounts of metal impurities to avoid the matrix problems. The proposed method provides good results for determination of Fe, Cr and Ni contained in MOX samples at a significant quantity level.

Keywords: Direct Current Arc Atomic Emission Spectroscopy, DCA, MOX, Standard Addition Analysis, Impurity

---

※: Visiting Researcher (Currently Japan Nuclear Fuel Limited)

目次

1. はじめに.....	1
2. 実験.....	2
2.1 MOX 粉末.....	2
2.2 標準試料及び試薬.....	2
2.3 装置.....	2
2.4 試料調製.....	3
2.5 DCA-AES 測定.....	3
2.6 ICP-AES による比較分析.....	4
2.6.1 試料調製.....	4
2.6.2 ICP-AES 測定.....	4
3. 結果及び考察.....	5
3.1 標準添加法による MOX 粉末中 Fe, Cr, Ni 濃度の分析結果.....	5
3.2 ICP-AES との比較分析.....	7
4. まとめ.....	8
謝辞.....	8
参考文献.....	9

**Contents**

1. Introduction . . . . . 1

2. Experimental . . . . . 2

    2.1 MOX sample . . . . . 2

    2.2 Standard samples and reagents . . . . . 2

    2.3 Apparatus . . . . . 2

    2.4 Sample preparation . . . . . 3

    2.5 DCA-AES measurement . . . . . 3

    2.6 Comparative analysis by ICP-AES . . . . . 4

        2.6.1 Sample preparation . . . . . 4

        2.6.2 ICP-AES measurement . . . . . 4

3. Results and discussions . . . . . 5

    3.1 Analytical results of Fe, Cr, Ni concentration in MOX using the method of standard addition . . . . . 5

    3.2 Comparison of DCA-AES and ICP-AES . . . . . 7

4. Conclusions . . . . . 8

Acknowledgements . . . . . 8

References . . . . . 9

**List of Figures**

Fig. 2-1 Schematic view of DCA-AES..... 11

Fig. 2-2 Electrode of DCA-AES ..... 11

Fig. 2-3 Preparation scheme of standard addition and blank sample ..... 12

Fig. 3-1 Composition of standard addition and blank samples ..... 15

Fig. 3-2 Correction for measured values of standard addition samples..... 15

Fig. 3-3 Standard addition calibration curve for Fe determination in MOX-A and MOX-B .. 16

Fig. 3-4 Standard addition calibration curve for Cr determination in MOX-A and MOX-B .. 17

Fig. 3-5 Standard addition calibration curve for Ni determination in MOX-A and MOX-B .. 18

**List of Tables**

Table 2-1 Physical properties of MOX-A and MOX-B ..... 10

Table 2-2 United States Energy Research and Development Administration New Brunswick Laboratory Provisional Certificate of Analysis Standard Series No. 98 (1-7) U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> samples for spectrographic analysis..... 10

Table 2-3 Preparation of standard addition sample MOX-A ..... 13

Table 2-4 Preparation of standard addition sample MOX-B ..... 13

Table 2-5 Emission conditions for DCA-AES ..... 14

Table 2-6 Measurement conditions for ICP-AES ..... 14

Table 3-1 Analytical results of Fe, Cr, Ni concentration in MOX using standard addition method ..... 19

Table 3-2 Comparison of results obtained from DCA-AES and ICP-AES..... 19

This is a blank page.



## 1. はじめに

核燃料サイクル工学研究所の東海再処理施設プルトニウム転換技術開発施設では、PUREX 再処理による分離・精製工程から回収した硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液を重量比で 1:1 になるように混合し、ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 粉末を製造している。酸化物への転換は、ウラン・プルトニウムの混合硝酸溶液をマイクロ波加熱直接脱硝及び焙焼還元する技術が用いられている。ここで得られる MOX 粉末のキャラクタリゼーションにおいては、MOX 粉末に不純物として含有する鉄 (Fe)、クロム (Cr)、ニッケル (Ni) 等の金属元素の分析が必要とされる。

使用済燃料の再処理や MOX 転換処理により生成される試料 (硝酸ウラニル溶液、硝酸プルトニウム溶液、ウラン・プルトニウム混合酸化物等) 中の金属不純物元素の定量法としては、これまでに高周波誘導結合プラズマ発光分光法 (ICP-AES) 及び直流アーク放電発光分光法 (DCA-AES) の適用例が報告されている<sup>1)~6)</sup>。特に、ICP-AES は、多くの金属元素に対して高い感度及び精度を有した分析法であり、信頼性の高い分析値を与える手法として有用である<sup>7)~9)</sup>。しかし、ICP-AES は、溶液の状態を試料を導入する検出系であり、MOX のような固体試料を分析対象とする場合は、試料の溶解が必要であり、さらにマトリックス成分であるウラン・プルトニウムを分離した後に測定対象元素を測定する必要がある。MOX 粉末は難溶性であるため、その溶解には硝酸とフッ化水素酸の混酸による加熱操作が必要であり、溶解には長時間を有することに加え、ホウ素やケイ素等の揮発性の高いフッ化物を形成する元素は、揮発によるロスも発生する。

一方 DCA-AES は、ICP-AES と比較して測定の精度は劣るものの、対象元素を溶液化することなく固体試料をそのまま分析できる有用性の高い手法である<sup>1)</sup>。DCA-AES を実試料の分析に適用する場合、分析試料と標準試料の化学的性質及び物理的性質の相違に起因するマトリックス効果の影響を受けやすく<sup>10)</sup>、正確な分析を行うためには、マトリックスマッチングなどの問題を克服できる標準物質の選択が重要な課題であった<sup>4)</sup>。

本報では、試料マトリックスの影響を考慮して、既知量の不純物金属元素を含有する八酸化三ウラン ( $U_3O_8$ ) の標準物質を用いた標準添加法を適用することによって、MOX 粉末中に有意量が含まれる Fe, Cr, Ni の定量を検討した結果について報告する。

## 2. 実験

### 2.1 MOX 粉末

本試験では、プルトニウム転換技術開発施設で実際に製造された 2 種類の MOX 粉末を使用した。MOX 粉末の物性を Table 2-1 に示す。

### 2.2 標準試料及び試薬

本試験で使用した標準試料及び試薬を以下に示す。

- (1)  $U_3O_8$  標準物質  
New Brunswick Lab.製の  $U_3O_8$  不純物元素標準試料 (NBL 98 series, No.1~7) を使用した。  
本試料の認証書に記載のある全元素濃度を Table 2-2 に示す。
- (2) 酸化ガリウム  
和光純薬工業製の酸化ガリウム(III) ( $Ga_2O_3$ ) 99.99%を使用した。
- (3) 純水  
ADVANTEC 製蒸留水製造装置で蒸留されたものを MILLIPORE 製 Milli-Q 超純水製造装置で処理して使用した。
- (4) 硝酸  
関東化学製試薬特級 60-61 %を純水によって任意の濃度に希釈したものを使用した。
- (5) フッ化水素酸  
関東化学製試薬特級 46-48 %を使用した。
- (6) Fe 標準溶液  
関東化学製原子吸光分析用標準溶液(1000 ppm)を 3 M 硝酸で任意の濃度に希釈したものを使用した。
- (7) Cr 標準溶液  
関東化学製原子吸光分析用標準溶液(1000 ppm)を 3 M 硝酸で任意の濃度に希釈したものを使用した。
- (8) Ni 標準溶液  
関東化学製原子吸光分析用標準溶液(1000 ppm)を 3 M 硝酸で任意の濃度に希釈したものを使用した。
- (9) U 及び Pu 分離用抽出クロマトグラフィー樹脂  
Eichrom Technologies 製 UTEVA-Resin をカラムに 10 ml 充填し、3 M 硝酸 200 ml を添加してコンディショニングしたものを使用した。

### 2.3 装置

#### (1) DCA-AES

本試験に使用した DCA-AES 装置の構成図を Fig. 2-1 に示す。DCA-AES は、金属試料と

対電極の間にスパーク放電を発生させる発光スタンド、放電のための高電圧を制御する発光装置部、分光部及び測光部から構成されている。本分析の対象試料は、高濃度の Pu を含むことから、グローブボックス内で取り扱う必要がある。そのため、本測定では、島津製作所製 GQM-1000S 型を改造し、発光スタンドをグローブボックス内部に、その他の機器をグローブボックスの外部に分割して設置した。発光スタンドからの発光は、空气中を通過し、集光レンズを介してグローブボックスのガラス窓からグローブボックス外部に出され、さらに集光レンズを介して分光部に導入される構造となっている。

本試験で使用した電極を Fig. 2-2 に示す。発光は、発光スタンド内部に支持極及び対極を固定し、試料を充填した試料極（筒状電極：4mm φ, 10mmH）を支持極上部にのせ、対極と支持極の間が 3 mm を保つように、電極間隔を調整しながら行った。試料極、対極、支持極は全て MERSEN 製のグラファイト電極を使用し、試料極、対極は SPK/USP グレード、支持極は SPK グレードのものを使用した。

## (2) ICP-AES

ICP-AES には、グローブボックス内に設置されたセイコーインスツル製 SPS7700 を用いた。

## 2.4 試料調製

DCA-AES 測定のための試料調製のフローを Fig.2-3 に示す。MOX 粉末中の U と Pu は、それぞれ  $UO_2$  及び  $PuO_2$  の酸化物として存在している。本測定では、U の揮発や化学形態の変化が発光強度に影響することを抑制するため、白金容器に MOX 粉末（約 0.5 g 採取）を採取し、電気マッフル炉で 850 °C にて空気雰囲気下で 2 時間加熱し、 $UO_2$  を最も揮発性の低い安定な化学形態である  $U_3O_8$  に酸化した。加熱後の試料は、デシケータ内で 20 分間放冷した。放冷後、白金容器の重量を測定し、加熱前にあらかじめ秤量しておいた白金容器の重量を減算することで加熱後の試料重量を求め、酸化による重量変化を求めた。

また、酸化物（ $U_3O_8$ ,  $PuO_2$ ）試料に、試料重量の数 wt% に相当する酸化ガリウムを添加することで、アークプラズマ中での不純物元素の励起効率が向上し、スペクトル発光線の強度が増大する<sup>6)</sup>。本試験では、試料重量の 3wt% に相当する酸化ガリウムを増感剤として測定試料に添加した。MOX 粉末、 $U_3O_8$  標準物質及び酸化ガリウムは、ボールミル粉碎用ボールが入ったガラスバイアルに分取し混合した。

本試験では、2 種類の MOX 粉末 (MOX-A, MOX-B) について試料調製を行った。MOX-A, MOX-B と  $U_3O_8$  標準物質及び酸化ガリウムとの混合割合をそれぞれ Table 2-3 及び Table 2-4 に示す。

## 2.5 DCA-AES 測定

2.4 節で調製した標準添加試料を試料電極に 0.08 g 採取した。採取した試料は、ステンレス鋼製の棒状治具を用いて試料にプレス成型し、測定用試料とした。次に、試料電極、対

極及び支持電極を発光スタンドに設置したのち放電を開始した。対極と試料電極の間は、常に一定の距離（3 mm）を保つように放電中に適宜調整した。発光強度の経時変化をピークプロファイルとして取得し、このときのピークの面積を発光強度として記録した。Fe, Cr, Ni の発光強度の測定は、それぞれ 302.06 nm, 267.72 nm 及び 305.08 nm の波長を用いた。また、各試料は 6 回測定し、その平均値を発光強度として用いた。DCA-AES の発光条件を Table 2-5 に示す。

## 2.6 ICP-AES による比較分析

### 2.6.1 試料調製

MOX 粉末 0.2 g を 50 mL ビーカーに採取し、8 M 硝酸 20 mL 及びフッ化水素酸 30  $\mu$ L を添加した後、120  $^{\circ}$ C のヒータ上で加熱した。溶液量が 2 mL $\sim$ 3 mL 程度となったところで 3 M 硝酸を 8 mL 加え、乾固寸前までさらに加熱し、MOX 粉末を溶解した。この溶解液には放冷後 3 M 硝酸を 10 mL 添加した。次に、溶解液を UTEVA-Resin が 10 mL 充填されたポリエチレン製の分離カラムに通液し、Pu 及び U を UTEVA-Resin に抽出した後、3 M 硝酸を 3 mL ずつ 12 回に分けて洗浄し Fe, Cr, Ni を溶出液に回収した。回収液は 3 M 硝酸で 100 mL に定容し、ICP-AES のための測定試料とした。

また、加熱溶解操作から UTEVA-Resin による抽出操作までの Fe, Cr, Ni の回収率を確認するため、Fe, Cr, Ni 濃度を 80 mg/L に調製した濃度既知の標準溶液 2 mL について、MOX 粉末と同様の試料調製を平行して行った。

### 2.6.2 ICP-AES 測定

Fe, Cr, Ni の測定には、それぞれ 238.204 nm, 205.552 nm 及び 221.647 nm の波長を用いた。測定条件等を Table 2-6 に示す。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 標準添加法による MOX 粉末中 Fe, Cr, Ni 濃度の分析結果

本試験に用いた MOX 粉末は, Fe, Cr, Ni の含有量が比較的高く, 特に Fe は約 3000  $\mu\text{g/g-MOX}$  と非常に高い試料であった。この MOX 試料を DCA-AES の試料電極に全量充填して測定した場合に観測される発光強度は非常に強く, 測定の適正なレンジを超えていた。そのため, 本試験では, MOX 粉末の含有率が 5%程度になるように, 測定対象元素の含有量が異なる  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質 (濃度  $C_S$ ) を希釈混合した試料 (混合試料, Fig. 3-1(b)) を調製し, それらの強度  $I_S$  を測定した (Fig. 3-2 (a))。  $I_S$  には,  $\text{U}_3\text{O}_8$  に起因する強度分が含まれるため, 濃度系列 1 (Fig. 3-1 (b) 1) の試料に添加した  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質の強度  $I_{US1}$  を減算し, 測定対象元素に起因する強度  $I'_{S,X}$  を算出した。

$$I'_{S,X} = I_{S,X} - I_{US1} \quad (X = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

ここで, 添え字  $S$  は混合試料, 添え字  $X$  は濃度系列の番号, 添え字  $US1$  は濃度系列 1 の混合試料中の  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質を示す。

$I_{US1}$  は, MOX 粉末を添加しない, 濃度系列 1 に添加したのと同じ  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質 (ブランク試料, Fig. 3-1(a)) の発光強度  $I_B$  を測定し, その強度を, ブランク試料の重量  $W_{UB}$  と, MOX 試料に添加した  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質の重量  $W_{US}$  (濃度系列 1~4 の  $W_{US}$  は全て同重量) の重量差分を補正して求めた。

$$I_{US1} = I_B \times W_{US} / W_{UB} \quad (2)$$

(2)を(1)に代入して整理すると,  $I'_{S,X}$ は以下の式(3)で表される。

$$I'_{S,X} = I_{S,X} - I_B \times W_{US} / W_{UB} \quad (X=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

ブランク試料の  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質には, 測定対象元素が既知量含まれるため, その濃度  $C_{US1}$  を減算して補正する。  $I'_{S,X}$  (Fig. 3-2(b)の縦軸) に対応する MOX 粉末に添加した標準試料濃度  $C'_{US,X}$  (Fig. 3-2(b)) は以下の式(4)で表される。

$$C'_{US,X} = C_{US,X} - C_{US1} \quad (X=1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

ブランク試料の  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質に含まれる測定対象元素濃度を  $C_B$  とすると,  $C_{US1}$  は, ブランク試料の重量  $W_{UB}$  と, MOX 試料に添加した  $\text{U}_3\text{O}_8$  標準物質の重量  $W_{US}$  の重量差分を補正

して以下の式(5)で表される。

$$C_{US1} = C_B \times W_{US} / W_{UB} \quad (X=1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

(5)を(4)に代入して整理すると、 $C'_{S,X}$  は以下の式(6)で表される。

$$C'_{US,X} = C_{US,X} - C_B \times W_{US} / W_{UB} \quad (X=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

$I_{S,X}$ 及び $I_B$ をそれぞれ6回測定し、その平均値から $I'_{S,X}$ を求め $C'_{S,X}$ に対してプロットして作成したFe, Cr, Niの検量線を、それぞれFig. 3-3, Fig. 3-4, Fig. 3-5に示す。2つのMOX粉末ともに、Fe, Cr, Niの全ての検量線において、相関係数 $r > 0.99$ の良好な直線関係が得られた。

この検量線から、MOX粉末1gあたりの測定対象元素濃度 $Z$ を(7)式のとおり算出した。また、その標準偏差 $S_x$ を、検量線のx軸切片が持つ標準偏差より評価した<sup>11)</sup>。

$$Z[\mu\text{g/g} - \text{MOX}] = \frac{b}{a} \times \frac{W_S}{W'_S} \times R_{\text{MOX}} \quad (7)$$

$$R_{\text{MOX}} = \frac{W_{\text{MOX before heating}}}{W_{\text{MOX}}}$$

ここで

- $a$  : 検量線の傾き
- $b$  : 検量線の切片
- $W_S$  : 標準添加試料重量[ g ]
- $W'_S$  : 試料電極への充填量[ g ]
- $W_{\text{MOX}}$  : 加熱酸化後 MOX 粉末の採取量[ g ]
- $W_{\text{MOX before heating}}$  : 加熱酸化前 MOX 粉末の採取量[ g ]
- $R_{\text{MOX}}$  : 加熱による MOX の重量変化比

$$S_x = S_x \times \frac{W_S}{W'_S \times W_{\text{MOX}}} \times R_{\text{MOX}}$$

$$S_x = \frac{S_b}{a} \times \left\{ \frac{1}{n} + \frac{\bar{y}^2}{a^2 \times \sum_i^n (C_i - \bar{C})^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$S_b = \left\{ \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

- $S_x$  : 標準偏差 (MOX 粉末 1 g あたり)  
 $S_x$  : 標準偏差 (測定試料 0.08 g あたり)  
 (検量線の x 線上の負の切片の標準偏差)  
 $S_b$  : 検量線の y 切片に対する標準偏差  
 $n$  : 検量線のプロット数  
 $C_i$  : 各測定試料中の標準添加濃度 [ $\mu$  g/0.08 g-sample ]  
 $\bar{C}$  :  $C_i$  の平均値 [ $\mu$  g/0.08 g-sample ]  
 $y_i$  :  $C_i$  に対応する実際の測定強度  
 $\hat{y}_i$  :  $C_i$  に対応する検量線上の値  
 $\bar{y}$  :  $y_i$  の平均値

ここで得られた結果を Table 3-1 に示す。本法による MOX 粉末中の各元素の分析値(MOX-A と MOX-B の平均値) は, Fe で  $3.4 \times 10^3$  [ $\mu$  g/g-MOX ], Cr で  $7.4 \times 10^2$  [ $\mu$  g/g-MOX ], Ni で  $4.7 \times 10^2$  [ $\mu$  g/g-MOX ]であり, その相対標準偏差は MOX-A と MOX-B それぞれ, Fe で 7.6% と 11%, Cr で 2.4% と 4.3%, Ni で 5.5% と 8.7%であった。

### 3.2 ICP-AES との比較分析

標準添加法を用いた DCA-AES による分析値の妥当性を評価するため, MOX 粉末を溶解し, 固相抽出法により化学分離した試料を ICP 発光分光法で分析し, 本報の結果と比較した。両分析法による分析結果を Table 3-2 に示す。本分析法の分析値は, ICP 発光分光法の分析値に対して Fe で-6.8%~9.5%, Cr で-20~-18 %, Ni で-28%~6.1%の差の範囲で一致する結果が得られた。MOX-A の Ni については, その差が-28 %と比較的大きかったが両法の有する不確かさを考慮すれば, 有意な差があるとは言えない。

#### 4. まとめ

本試験では、東海再処理施設において製造された MOX 粉末中の主要な不純物元素 (Fe, Cr, Ni) の定量のため、既知量の金属元素を含む  $U_3O_8$  標準物質を MOX 粉末に添加する標準添加法を DCA-AES 分析に適用した。その結果、DCA-AES で得られた分析値は、参照法として実施した ICP-AES の分析値と良好に一致する結果が得られ、本法の MOX 粉末の不純物元素の定量法としての有用性が確認できた。

DCA-AES は、ICP-AES と比較して測定対象試料に対する最適化がやや困難な部分がある。すなわち、DCA-AES は、分析値の正確さに影響を及ぼすマトリックスに起因する因子が多く、MOX 粉末の化学組成や物理的性状が変化した場合、これらの影響により分析値に偏りを生じることに十分留意する必要がある。このため、試料の組成や物性の変化に応じて、信頼性の高い化学分析法による分析値との比較により分析条件の最適化を行うことが重要である。こうした難点を除けば、DCA-AES は、固体試料をそのまま測定することが可能であり、各対象元素の測定濃度範囲を適切に設定し、ルーチン分析としてカスタマイズできれば、分析結果を迅速かつ簡便に得ることができ、MOX 製造工程における品質管理の分析として非常に魅力的な方法であるといえる。

#### 謝辞

本件の実施にあたっては、検査開発株式会社の金成敦史氏、大谷義定氏に多大なご協力とご支援を頂きましたことを深く感謝いたします。



参考文献

- 1) Scribner, B. F. , Mullin, H. R., : “Carrier-Distillation Method for Spectrographic Analysis and Its Application to the Analysis of Uranium-Base Materials ” , J. Res. Nat. Bur. Stand. , Vol. 37, 1946, pp.379-389.
- 2) ASTM C696-11 “Standard Test Methods for Chemical, Mass Spectrometric, and Spectrochemical Analysis of Nuclear-Grade Uranium Dioxide Powders and Pellets”.
- 3) J.E. Rein et al. Eds. “Method of Chemical Analysis for FBR U-Pu Oxide Fuel and Source Materials”, LA-4622, 1971.
- 4) IAEA Technical Reports Series No. 341 “Analytical Techniques in Uranium Exploration and Ore Processing”, 1992, pp.130-137.
- 5) ASTM E402 “Standard Test Method for Spectrographic Analysis of Uranium Oxide (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) by Gallium Oxide-Carrier Technique”, 1995.
- 6) 半田宗男, 他 : “発光分光分析法による核燃料中の金属不純物元素の定量の現状 (調査報告書)” , JAERI-M 90-015, 1990, 134p.
- 7) Seshagiri, T. K., Babu, Y., Kumar, M. L. J., Dalvi, A. G. I., Sastry, M. D., Joshi, B. D. : “Application of ICP-AES for the Determination of Dy, Eu, Gd, Sm, and Th in Uranium after Chemical Separation” , Talanta, Vol. 10, 1984, pp.773-776.
- 8) Larson, G. F., Slagle, R. E. : “Contribution to ASTM C-26.05 Task Group: Determination of Impurities in Uranium by ICP-AES after Separation with TBP” , Y/DK-357, DE-83-017867, 1984.
- 9) Ko, R. : “The Determination of Impurities in Plutonium Nitrate Solution by Amine Extraction and ICP Analysis” , Applied Spectroscopy, Vol. 38, 1984, pp.909-910.
- 10) 佐野貞雄 : “応用分光学 第1講 発光分光分析” , 分光研究, 21, 1972, pp.43-58.
- 11) Miller, James N. (著), Miller, Jane C. (著), 宗森信(訳), 佐藤寿邦 (訳), : 「データのとり方とまとめ方 第2版 」 , 共立出版, 2004.

Table 2-1 Physical properties of MOX-A and MOX-B

	MOX-A	MOX-B
Pu content	41.4 wt%	41.5 wt%
U content	43.6 wt%	43.6 wt%
Am content	2.9 wt%	2.6 wt%
Specific surface area	4.7 m <sup>2</sup> /g	4.4 m <sup>2</sup> /g
Average particle size	1.4 μm	1.4 μm
O/M (Oxygen-to-Metal atom ratio)	2.1	2.1

Table 2-2 United States Energy Research and Development Administration  
New Brunswick Laboratory Provisional Certificate of Analysis Standard Series No. 98 (1-7)  
U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> samples for spectrographic analysis

Element	98-1	98-2	98-3	98-4	98-5	98-6	98-7
Aluminium	522	214	115	55	25	15	5
Antimony	25	10	5	2.5	1	0.5	0
Barium	50	20	10	5	2	1	0
Beryllium	25.7	10.5	5.3	2.8	1	0.5	0
Bismuth	46	15	7	4	1	0.4	<0.2
Boron	5.5	2.3	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1
Cadmium	5.6	2.6	1.9	0.7	0.6	0.5	0.3
Calcium	100	42	19	9.5	4.5	3.5	1.5
Chromium	101	42	22	12	9	5	2
Cobalt	25	11	5	2.7	1	0.6	0.06
Copper	51	22	10	5.4	2.4	1.1	0.4
Indium	8	2.7	1.4	0.7	0.3	0.2	<0.2
Iron	515	215	110	58	32	20	13
Lead	46	18	9	5.6	2.5	1.7	0.8
Lithium	26.2	10.3	5	2.3	1.2	0.5	0
Magnesium	91	34	17	9	4	2	1
Manganese	49.2	20.5	10.6	5.2	2.9	1.8	0.8
Molybdenum	51	20	10	5	2	1	<0.1
Nickel	103	40	22	12	5.6	3.8	2
Phosphorus	505	198	99	51	23	13	3.7
Potassium	725	270	138	71	28	11.5	2.3
Silicon	315	140	65	30	10	6	2
Silver	315	2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1
Sodium	6	183	88	39	16	8	4
Strontium	455	21	10	5.2	2.6	1.8	0
Tin	55	18	10	4.7	2.5	1.2	<1
Titanium	50	20	11	5.5	2.1	1.2	0.3
Tungsten	48	19	9.9	5	2	1	<0.1
Nanadium	250	100	50	20	10	5	0
Zinc	480	195	96	50	19	11	1.5

Unit: μg of impurity element / g of Uranium (metal)

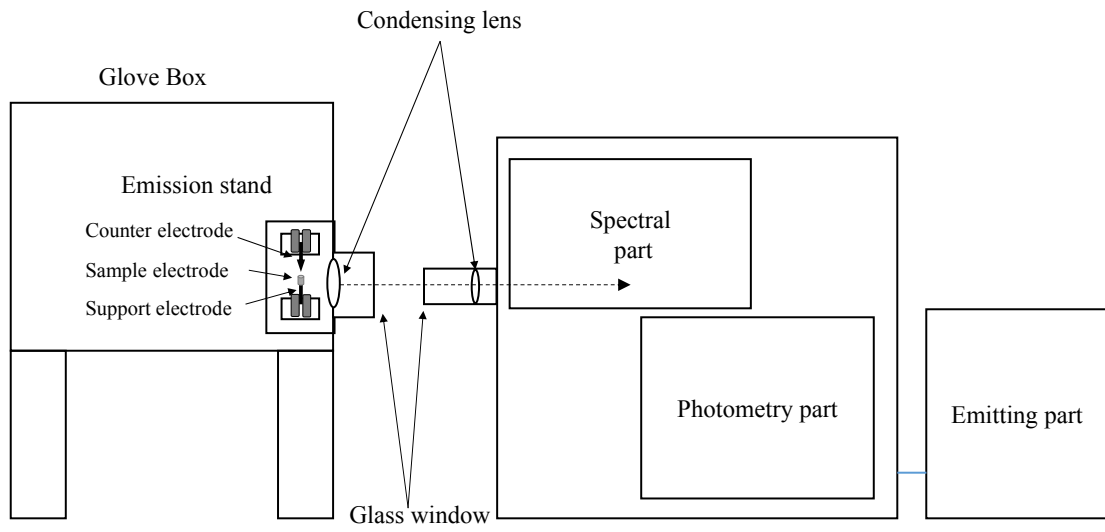


Fig.2-1 Schematic view of DCA-AES

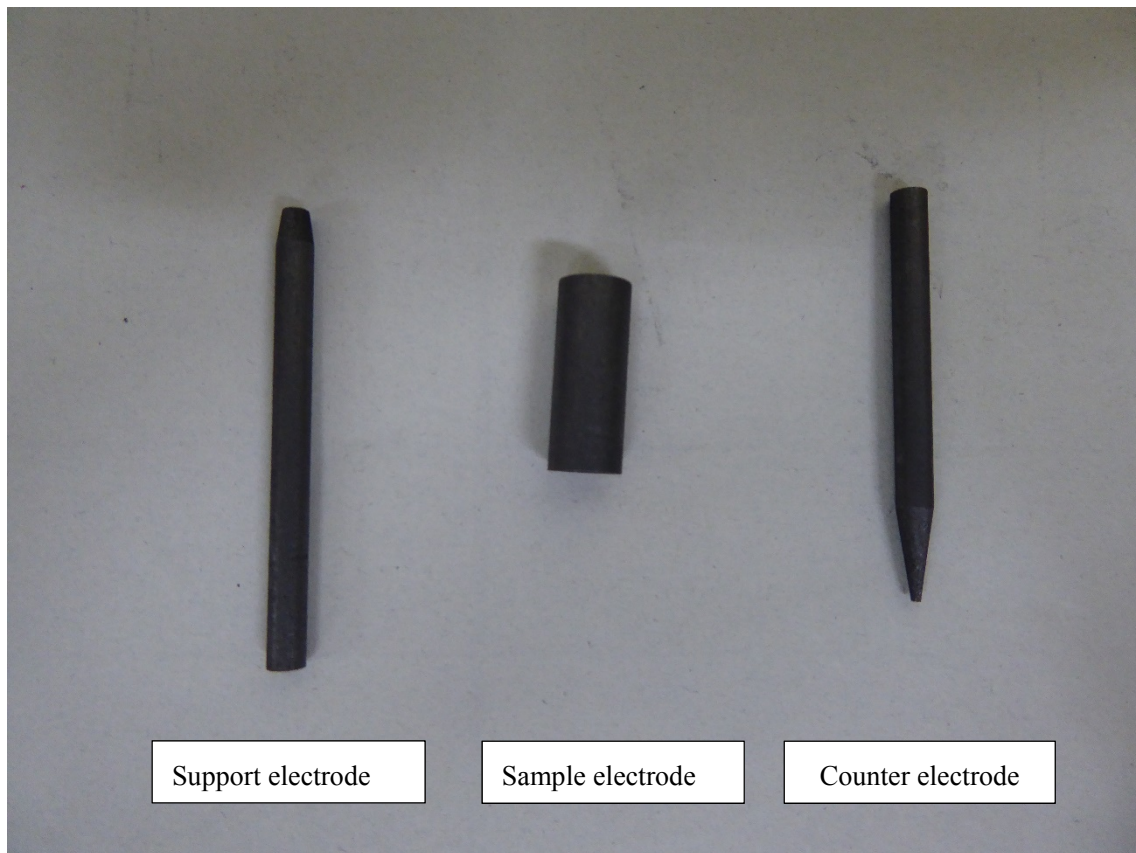


Fig.2-2 Electrode of DCA-AES

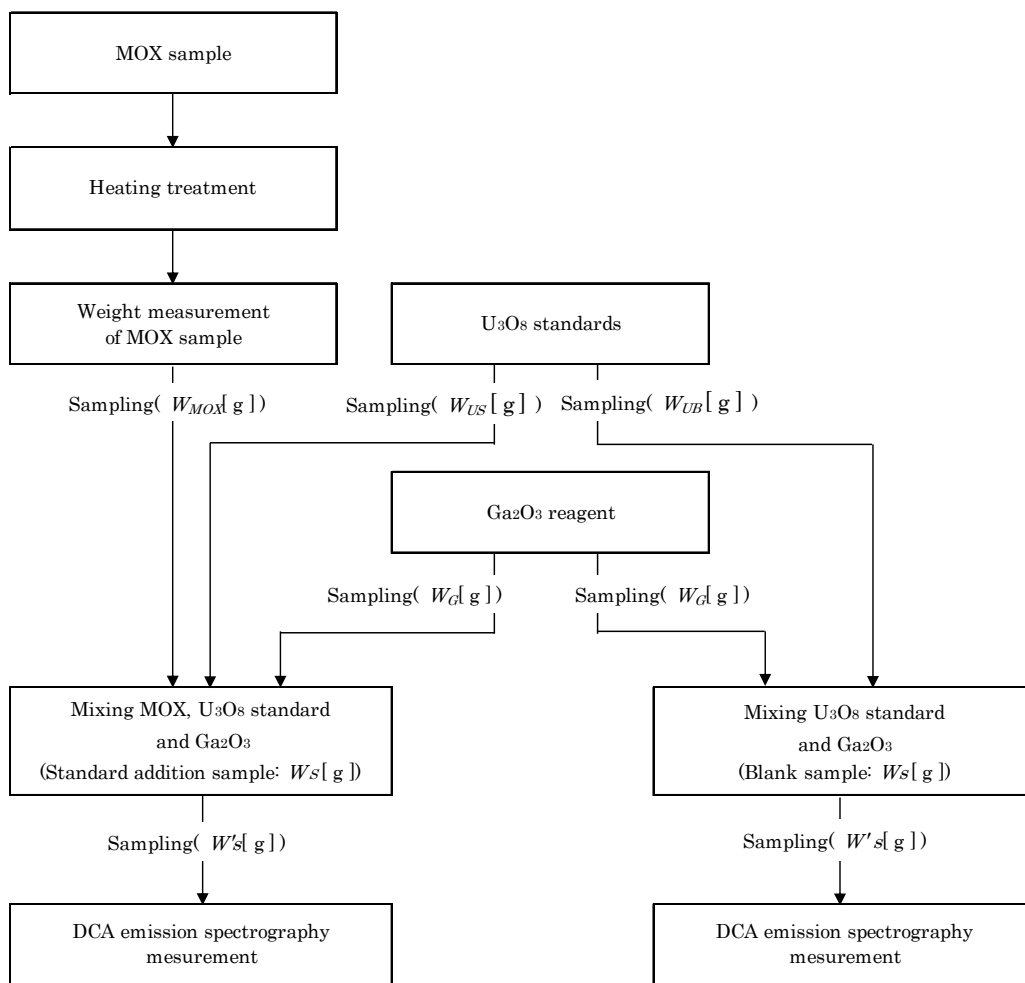


Fig.2-3 Preparation scheme of standard addition and blank sample

Table 2-3 Preparation of standard addition samples MOX-A

Element	Standard addition sample	Sampling amount [g]						Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		MOX	No. 98-1	No. 98-2	No. 98-4	No. 98-6	No. 98-7	
Fe	Blank	0	0	0	0	0	1.00	0.03
	Sample1	0.02	0	0	0	0	0.98	
	Sample2	0.02	0	0	0	0.18	0.80	
	Sample3	0.02	0	0	0.18	0	0.80	
	Sample4	0.02	0	0.18	0	0	0.80	
Cr	Blank	0	0	0	0	0	1.00	0.03
	Sample1	0.02	0	0	0	0	0.98	
	Sample2	0.02	0	0	0.18	0	0.80	
	Sample3	0.02	0	0.18	0	0	0.80	
	Sample4	0.02	0.18	0	0	0	0.80	
Ni	Blank	0	0	0	0	0	1.00	0.03
	Sample1	0.02	0	0	0	0	0.98	
	Sample2	0.02	0	0	0.18	0	0.80	
	Sample3	0.02	0	0.18	0	0	0.80	
	Sample4	0.02	0.18	0	0	0	0.80	

Table 2-4 Preparation of standard addition samples MOX-B

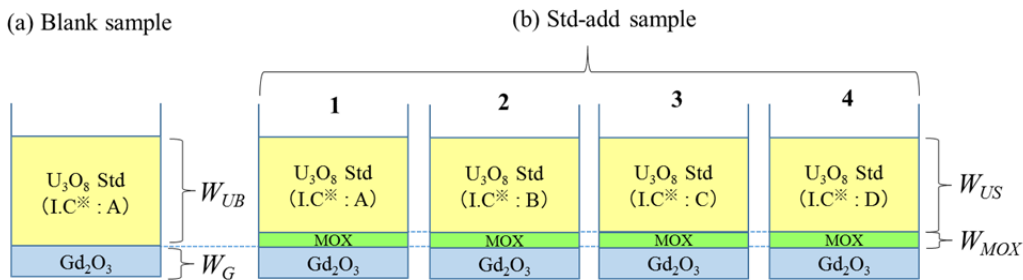
Element	Standard addition sample	Sampling amount [g]					Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		MOX	No. 98-4	No. 98-5	No. 98-6	No. 98-7	
Fe	Blank	0	0	0	0	0.80	0.024
	Sample1	0.01	0	0	0	0.79	
	Sample2	0.01	0	0	0.30	0.49	
	Sample3	0.01	0	0.20	0.59	0	
	Sample4	0.01	0.40	0.39	0	0	
Cr	Blank	0	0	0	0	0.80	0.024
	Sample1	0.01	0	0	0	0.79	
	Sample2	0.01	0	0	0.30	0.49	
	Sample3	0.01	0	0	0.69	0.10	
	Sample4	0.01	0	0.29	0.50	0	
Ni	Blank	0	0	0	0	0.80	0.024
	Sample1	0.01	0	0	0	0.79	
	Sample2	0.01	0	0.20	0.59	0	
	Sample3	0.01	0	0.69	0.10	0	
	Sample4	0.01	0.40	0.39	0	0	

Table 2-5 Emission conditions for DCA-AES

Output current	10 A
Discharge time	75 s
Diffraction grating	1666.7 line / mm (3470 Å)
Slit width	30 μm
Distance between electrodes	4 mm
Pre-Discharge time	(Fe) 2 s
	(Cr) 2 s
	(Ni) 15 s

Table 2-6 Measurement conditions for ICP-AES

Plasma Operating condition	
RF frequency	27.12 MHz
RF output	1.2 kW
Photometric height	15 mm
Argon gas pressure	0.45 MPa
Carrier gas flow	0.4 L/min
Plasma gas flow	16 L/min
Spectrometer	
Method	Double monochromater
Wavelength range	175-800 nm
Resolution	0.006 nm (194 nm)
Detector	PMT



※ : I.C : Impurity element concentration,  $A < B < C < D$

Fig. 3-1 Composition of standard addition and blank samples

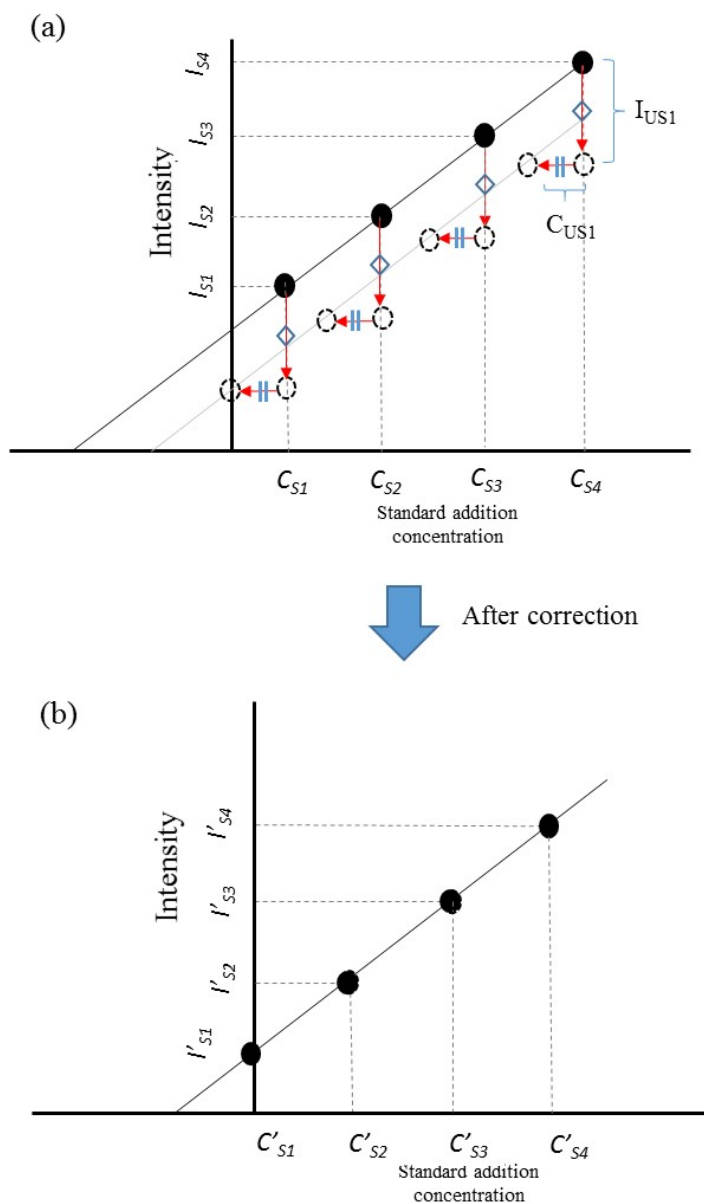


Fig. 3-2 Correction for measured values of standard addition samples

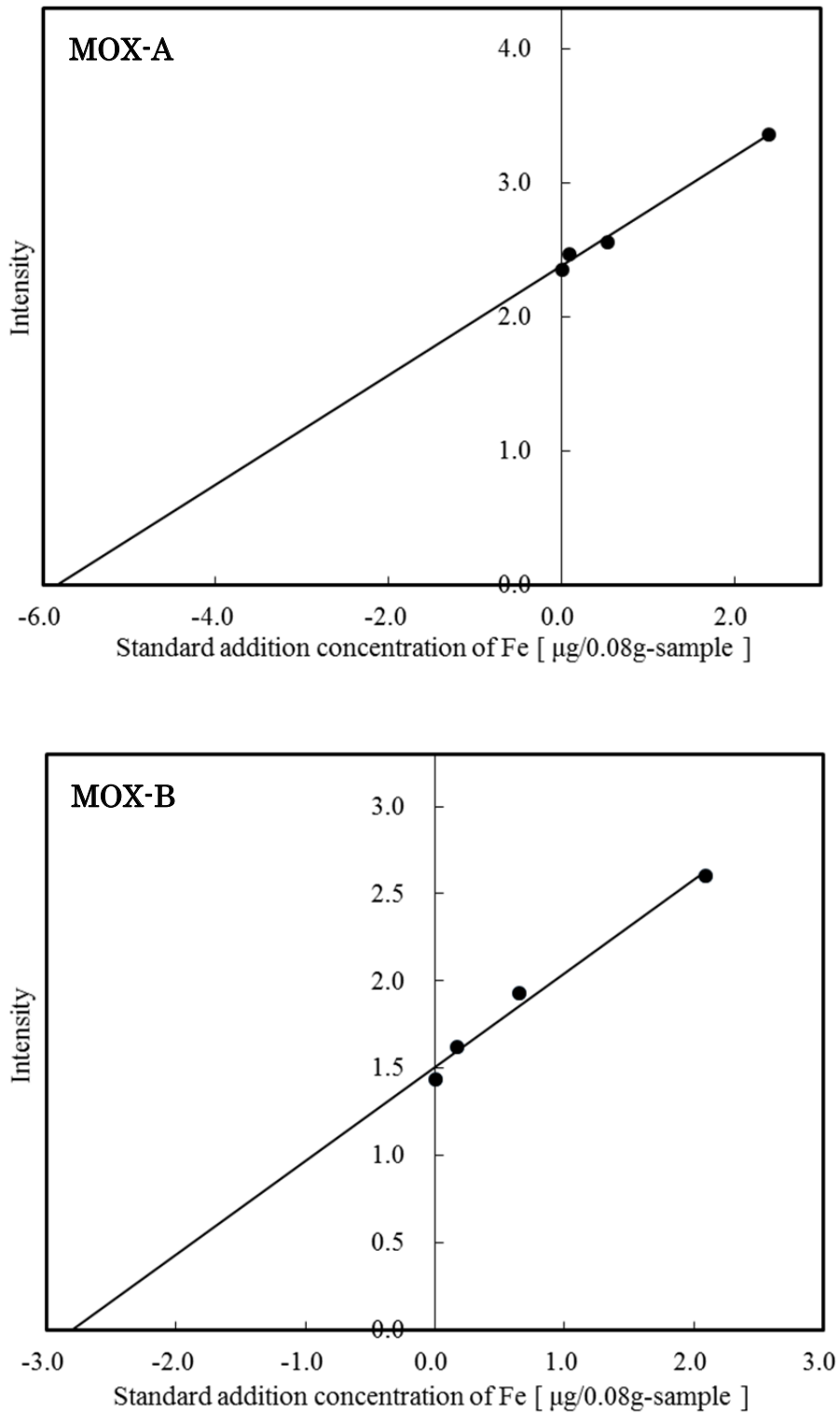


Fig.3-3 Standard addition calibration curve for Fe determination in MOX-A and MOX-B



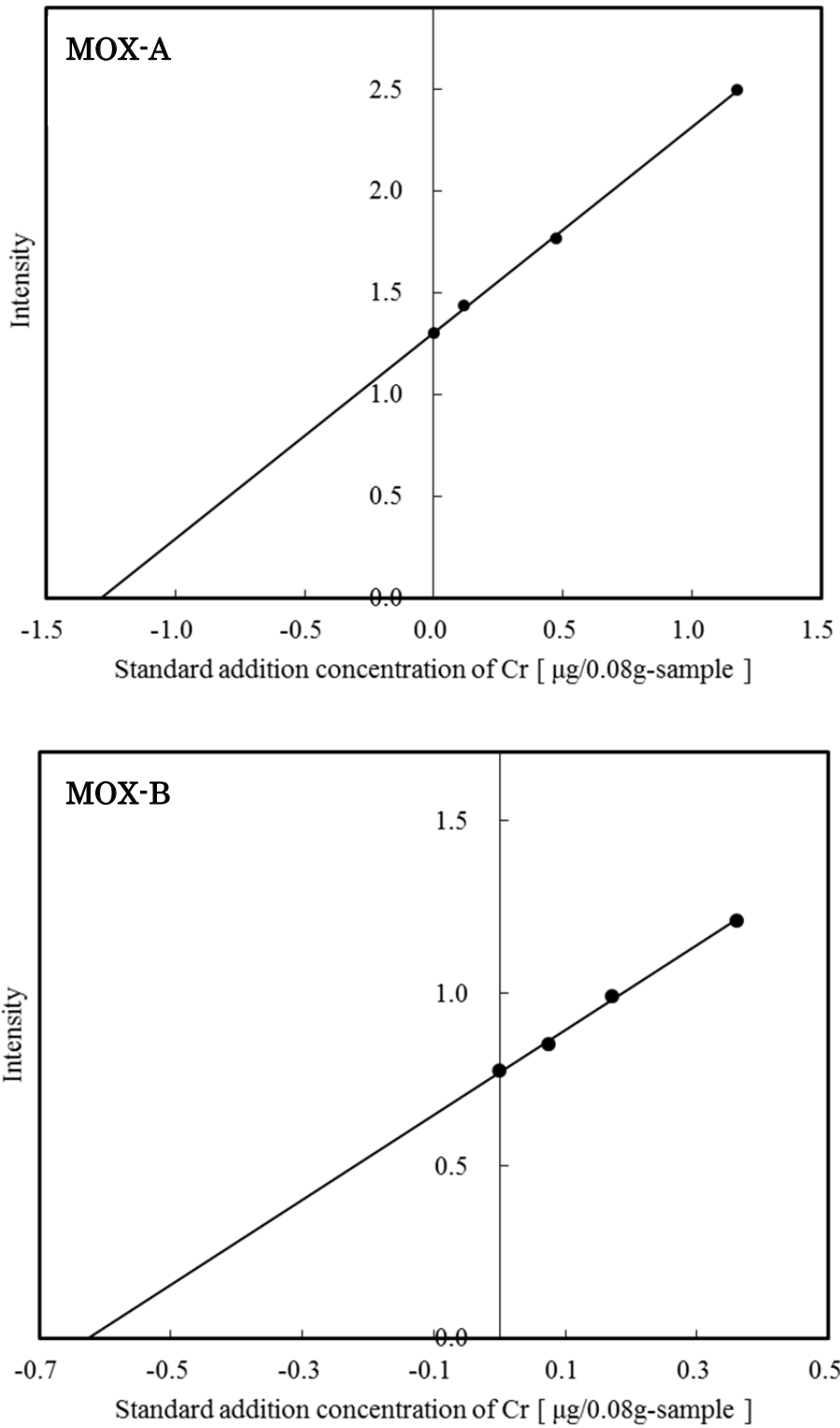


Fig.3-4 Standard addition calibration curve for Cr determination in MOX-A and MOX-B

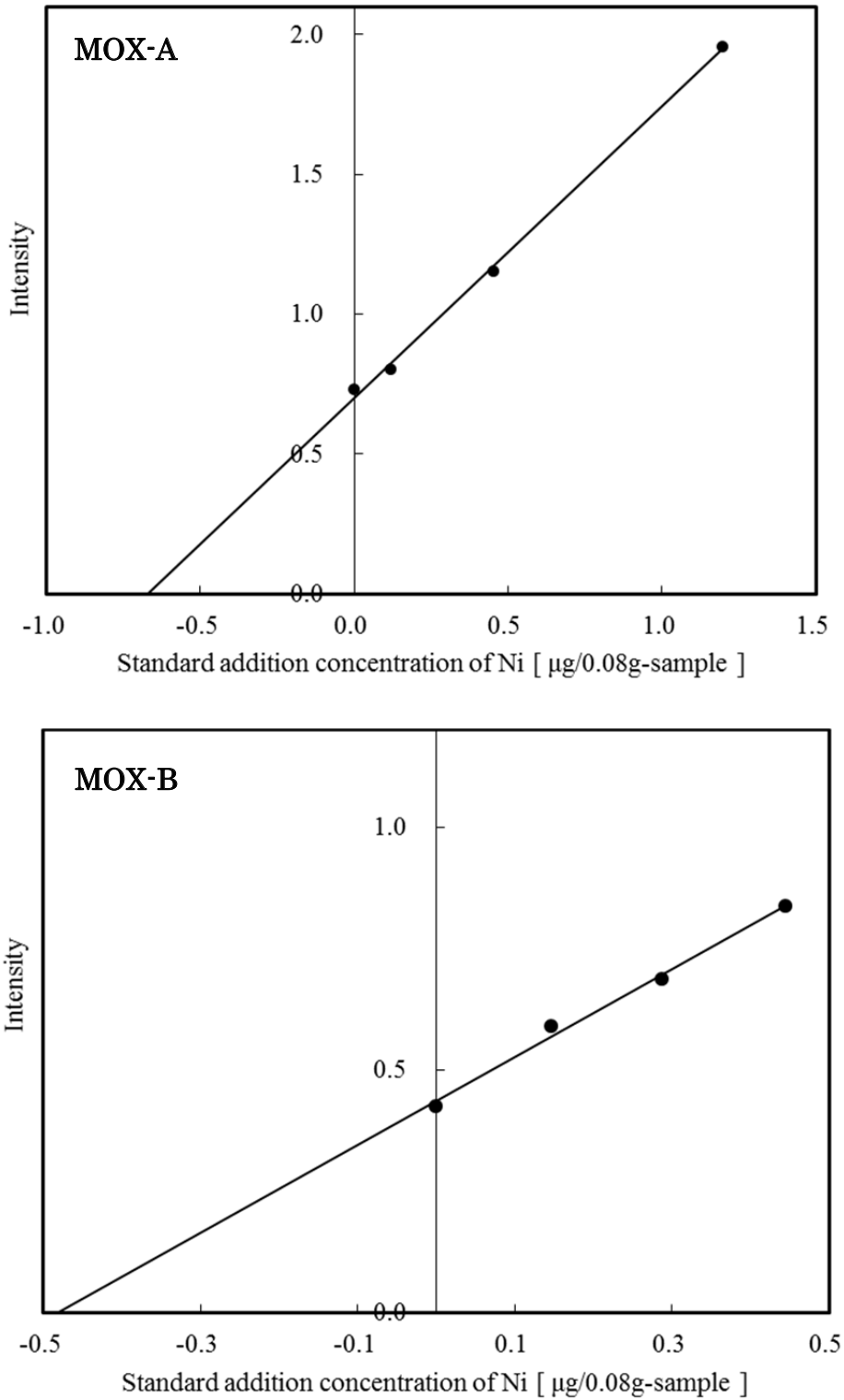


Fig.3-5 Standard addition calibration curve for Ni determination in MOX-A and MOX-B

Table 3-1 Analytical results of Fe, Cr, Ni concentration in MOX using standard addition method

Element	Analytical value [ $\mu\text{g/g-MOX}$ ]	SD <sup>1)</sup> [ $\mu\text{g/g-MOX}$ ]	RSD <sup>2)</sup> [ % ]
Fe			
MOX-A	$3.8 \times 10^3$	$2.9 \times 10^2$	7.6
MOX-B	$2.9 \times 10^3$	$3.3 \times 10^2$	11
Cr			
MOX-A	$8.2 \times 10^2$	$2.0 \times 10$	2.4
MOX-B	$6.5 \times 10^2$	$2.8 \times 10$	4.3
Ni			
MOX-A	$4.4 \times 10^2$	$2.4 \times 10$	5.5
MOX-B	$5.0 \times 10^2$	$4.4 \times 10$	8.7

1) Standard deviation; 2) Relative standard deviation

Table 3-2 Comparison of results obtained from DCA-AES and ICP-AES

Element	Concentration in MOX [ $\mu\text{g/g-MOX}$ ]		Difference [ % ]
	DCA-AES	ICP-AES	
Fe			
MOX-A	$3.8 \times 10^3$	$3.5 \times 10^3$	9.5
MOX-B	$2.9 \times 10^3$	$3.1 \times 10^3$	-6.8
Cr			
MOX-A	$8.2 \times 10^2$	$9.9 \times 10^2$	-18
MOX-B	$6.5 \times 10^2$	$8.2 \times 10^2$	-20
Ni			
MOX-A	$4.4 \times 10^2$	$6.1 \times 10^2$	-28
MOX-B	$5.0 \times 10^2$	$4.7 \times 10^2$	6.1

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

