

JAERI-Review

JP0350054

2003-005



## 5価ネプツニウム化合物中の陽イオン-陽イオン相互作用

2003年3月

N.N.KROT\*: 佐伯 正克

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。  
入手の問合わせは、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、お申し越し下さい。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  
頒布を行っております。

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.

## 5 値ネプツニウム化合物中の陽イオン-陽イオン相互作用

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部  
N.N.KROT\*・佐伯 正克\*

(2003年1月20日受理)

本総説は、ロシア科学アカデミー・物理化学研究所・N. N. Krot 教授により1997年に英文で記述されたものを、佐伯が翻訳したものが基礎となっている。また、本総説の基礎となった原稿は教授の来日前に急いで作成されたため、意味不明な箇所も存在した。そのような箇所については、原論文を読むことにより内容を補足したり、訳者注を付加した。更に、1997年以後のデータを若干附加した。

内容は、ネプツニウム5価化合物を中心に、陽イオン-陽イオン相互作用に関する全体像を記述したものである。まず、ネプツニウム5価化合物に現れる、陽イオン-陽イオン結合の特徴を紹介し、化合物中での陽イオン-陽イオン相互作用が、その物性に及ぼす影響や、陽イオン-陽イオン結合の確認手段等に言及した。更に、他のアクチニドイオンの固体化合物中に見いだされる、陽イオン-陽イオン結合を概観すると共に、アクチニドイオンの固体化合物中と溶液中の陽イオン-陽イオン相互作用を比較して述べた。

---

(本翻訳に際し Krot 教授の同意を得た)

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* 特別研究員

\* ロシア科学アカデミー・物理化学研究所

## Cation-cation Interaction in Neptunyl(V) Compounds

N.N.KROT\* and Masakatsu SAEKI\*

Department of Materials Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 20, 2003)

The original manuscript was prepared by Professor N. N. Krot of Institute of Physical Chemistry, Russian Academy of Sciences, in 1997. Saeki tried to translate that into Japanese and to add some new data since 1997.

The contents include the whole picture of cation-cation interactions mainly in 5-valence neptunium compounds. Firstly, characteristic structures of neptunium are summarized of the cation-cation bonding in compounds. Secondly, it is mentioned how the cation-cation bonding affects physical and chemical properties of the compounds. Then, characterization-methods for the cation-cation bonding in the compounds are discussed. Finally, the cation-cation interactions in compounds of other actinide ions are shortly reviewed.

Keywords : Neptunyl(V), Compound, Cation-cation Interaction, Neptunium, Uranyl(VI), Electron Absorption Spectra, IR Spectra, Moessbauer Effect, Coordination Polyhedra, Ligand

---

\* Scientific Consultant

\* Institute of Physical Chemistry, Russian Academy of Sciences

## 目次

1. 緒言	1
2. 陽イオン-陽イオン結合を有するネプツニウム5価化合物の特徴の要約	1
3. ネプツニウム5価化合物の物性に対する陽イオン-陽イオン相互作用の影響	4
3. 1 化合物の結晶化と溶解に関する特徴	5
3. 2 化合物の電子吸収スペクトル	5
3. 3 化合物の赤外線及びその他のスペクトル	7
4. 他のアクチニドイオンの固体化合物中の陽イオン-陽イオン相互作用	8
5. アクチニドの固体化合物中及び溶液中の陽イオン-陽イオン相互作用の比較	9
6. 1997年以降の概要	11
参考文献	14

## Contents

1. Introduction-----	1
2. Short Summary of Characteristics of Neptunium(V) Compounds with Cation-cation Interaction-----	1
3. Influence of Cation-cation Interaction on the Physical and Chemical Properties of Neptunium(V) Compounds-----	4
3.1 Crystallization and Dissolution of Compounds-----	5
3.2 Electron Absorption Spectra of Compounds-----	5
3.3 IR and Other Spectra of Compounds-----	7
4. Cation-cation Interaction of Other Actinide Ions-----	8
5. Comparison of Cation-cation Interaction in Solutions and Solid Compounds-----	9
6. Brief Summary since 1997-----	11
References-----	14

## 1. 緒言

アクチニルイオン ( $\text{AnO}_2^+$ ) が  $\text{AnO}_2^{2+}$  や他の陽イオンと特定な錯イオンを形成する場合、この現象を一般に「陽イオン-陽イオン相互作用」(以下 CCI と略記する) と呼ぶ。CCI は過塩素酸溶液中の  $\text{Np(V)}$  の  $\text{U(VI)}$  及び  $\text{Np(VI)}$ との挙動の違いについての研究により見いだされた<sup>1)</sup>。後に、CCI は溶液中の  $\text{NpO}_2^+$  と  $\text{Cr(III)}$ ,  $\text{Fe(III)}$ ,  $\text{Al(III)}$ ,  $\text{Ga(III)}$ ,  $\text{Sc(III)}$ ,  $\text{In(III)}$ ,  $\text{Th(IV)}$ ,  $\text{Hg(I)}$ ,  $\text{Bi(III)}$  及び  $\text{Rh(III)}$ との間に置いても観察された<sup>2,3)</sup>。更に、 $\text{Np(V)}$  と  $\text{U(V)}$ <sup>4,5)</sup>,  $\text{Pu(V)}$ <sup>6)</sup>,  $\text{Am(V)}$ <sup>7)</sup>に対しても、 $\text{NpO}_2^+$  は CCI を持つ能力があることが示された。

溶液中の 5 値アクチニドの CCI に関しては、種々の方面からの沢山の報告例がある<sup>1-36)</sup>。固体化合物中での最初の陽イオン-陽イオン結合 (以下 CCB と略記する) は  $[\text{Rh}(\text{H}_2\text{O})_5\text{NpO}_2]\text{F}_4$  について見いだされた<sup>9)</sup>。しかし、この化合物は純粋な形で調整されなかった上に、その構造も明らかにされなかつた。ネプツニウム化合物中で CCB が、X 線回折法で確認されたのは、メリティック酸ネプツニル(V)においてである<sup>37-39)</sup>。CCB が確認されて以後、20種以上のアクチニド化合物中に CCB が確認されている。従って、今やアクチニルイオンの固相中での CCI について一般的な特徴を論じ、溶液中での挙動に関するデータと比較することが出来る。アクチニル化合物中の CCI に関するこれまでの総説は文献 40 から 42 にまとめられている<sup>40-42)</sup>。

## 2. 陽イオン-陽イオン結合を有するネプツニウム 5 値化合物の特徴の要約

今日、CCB が X 線回折法で確認された  $\text{Np(V)}$  の化合物は 20 種類にのぼる (表 1 参照)。更に議論を深めるためには、化合物の主な構造を簡単に理解することが合理的であろう。構造に関する詳細な記述は文献 42 に示されている。  
(訳者注: 文献 42 は教授の弟子のロシア語記述の学位論文であり、入手困難である。)

固体化合物中で最も興味のある様相を呈する構造は、 $\text{Np(V)}$  とナトリウムのメリティック酸塩、 $\text{Na}_4(\text{NpO}_2)_2\text{C}_{12}\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、中に存在する 2 量体であり、2つの  $\text{NpO}_2^+$  が相互に (酸素を) 配位している<sup>37)</sup>。両  $\text{NpO}_2^+$  はお互いに単座配位子として作用しあい、同時に配位の中心となっている (図 1a 参照)。この形の CCI は一般的ではなく、表 1 に示した他の化合物中には見いだされていない。隣の

ネプツニウムとの距離が比較的近いことに特徴があり、Np-Np 間距離は約 3.48 Å である。

$(\text{NH}_4)_3[(\text{NpO}_2)_5(\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_8)_2] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  の構造はかなり複雑である<sup>38)</sup>。5つの結晶学的に異なる  $\text{NpO}_2^+$  が CCB に関与している（図 1b 参照）。そのうち2つは2座配位子として作用しており、隣の  $\text{NpO}_2^+$  の酸素を赤道面に含んでいる。他の  $\text{NpO}_2^+$  は単座配位子であるが、1つまたは2つの  $\text{NpO}_2^+$  と配位している。

$\text{Cs}_4[(\text{NpO}_2)_2\text{Cl}_4\text{NpO}_2\text{Cl}_2(\text{NO}_3)\text{H}_2\text{O}]$  の結晶格子中には、やはり等価でない  $\text{NpO}_2^+$  が存在するが、上述の化合物中とはまた異なっている。一部の  $\text{NpO}_2^+$  は、2つの酸素が共に他の Np(V) 原子に配位しているが、それ以上の CCB を形成していない（図 1c 参照）。残りの  $\text{NpO}_2^+$  は（Np(V) 原子が）配位の中心としてのみ関与している。

$(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  中の CCB は、Np(V) 化合物の構造中にしばしば観察されるので、特に興味のあるものである（図 1d 参照）<sup>43)</sup>。ネプツニル基は結晶学的に2種類存在し、歪んだ矩形のネットを形成している。全ての  $\text{NpO}_2^+$  は2座配位子として作用し、隣り合った2つのネプツニル基に配位している。その結果、全ての Np(V) 原子は4つの CCB を形成している。CCB の同様な形式は、 $\text{NpO}_2\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>45)</sup>,  $\text{NpO}_2\text{OOCH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>51)</sup>,  $(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ <sup>58)</sup>,  $\text{NpO}_2\text{OOCC}_6\text{H}_5 \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$ <sup>53)</sup> 中にも観察される。しかし、これらの個々の化合物中の陽イオン-陽イオンネットワークはそれぞれ多少の違いを示す。 $\text{NpO}_2\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>45)</sup> の結晶格子におけるネプツニル基のネットは、2種類の  $\text{NpO}_2^+$  が存在し、それぞれ配位圏に異なった数の  $\text{Cl}^-$  を持っている（1個及び3個である）。 $\text{NpO}_2\text{OOCH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>51)</sup> 中の全ての  $\text{NpO}_2^+$  は等価である。 $(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ <sup>58)</sup> 中の  $\text{NpO}_2^+$  は2種類であり、赤道面の酸素配位子の性質が異なることで区別できる。 $\text{NpO}_2\text{OOCC}_6\text{H}_5 \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$ <sup>53)</sup> 中には、結晶学的に異なる4種類の  $\text{NpO}_2^+$  が存在する。

$(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  中の CCB は  $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  中のそれよりも複雑であるが、いずれの場合にも  $\text{NpO}_2^+$  は2座配位子として作用しており、それぞれ他の2つのネプツニル基と結合している。 $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  中の CCB は結晶格子中で、2種類のネプツニウムの配位多面体を形成することに寄与している（図 2a 参照）。1つは5方両錐型であり、もう1つはこの化合物中で初めて見いだされた特殊な多面体である。その特殊な多面体は5方両錐型の1種であるが、2つの酸素原子が赤道面を挟んで上下になっている。同様の配位多面体は層状構造の  $[(\text{NpO}_2)_2(\text{OOCCH}_3)_2\text{H}_2\text{O}] \cdot \text{CH}_3\text{CN}$ <sup>54)</sup> 中に存在する。

$\text{NpO}_2\text{ClO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  の構造を更に研究した結果、 $\text{NpO}_2^+$  のジグザグ構造が存在することが明らかになった<sup>46)</sup>（図 3a 参照）。全てのネプツニル基が CCB 形成に関与し、1座配位子として働いている。同様な  $\text{NpO}_2^+$  のジグザグ構造は、

$\text{NpO}_2\text{OOCHOCH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>52)</sup> と  $(\text{NpO}_2)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ <sup>56)</sup> の構造中にも存在する。

$(\text{NpO}_2)_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  の結晶格子中に存在する CCB の形式は無限遠のリボン構造であり、5 方両錐と 6 方両錐の配位多面体を形成する 2 種類のネプツニル基が含まっている<sup>47)</sup> (図 3b 参照)。第 1 のタイプの  $\text{NpO}_2^+$  は 2 座配位子として作用し、もう一つのタイプのネプツニル基に配位している、後者は 1 座配位子として働き、僅か 2 つの CCB を形成している。

$\text{La}(\text{NpO}_2)_3(\text{NO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  の構造は、2 座配位子として作用している  $\text{NpO}_2^+$  イオンが相互に配位した、高い対象性を持つ編み目構造が存在するのが特徴である<sup>48)</sup> (図 3c 参照)。 $\text{NpO}_2^+$  イオンの赤道面には、酸素原子 6 個が存在し、4 個は硝酸イオンから 2 個は隣接するネプツニル基から配位している。

$\text{K}_4(\text{H}_5\text{O}_2)[(\text{NpO}_2)_3(\text{MoO}_4)_4] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  の結晶格子中には、5 方両錐と 4 方両錐のネプツニル基多面体が 2 : 1 の割合で存在する<sup>49)</sup>。最初のタイプの多面体は  $\text{MoO}_4^=$  と配位した  $\text{NpO}_2^+$  イオンからなり無限平面を形成している、この  $\text{NpO}_2^+$  イオンは単座配位子である。もう 1 種類の  $\text{NpO}_2^+$  イオン、 $\text{K}^+$  イオン、 $\text{H}_5\text{O}_2^+$  イオン及び結晶水は層間に存在する。この  $\text{NpO}_2^+$  イオンは赤道面に、 $\text{MoO}_4^=$  から 2 つ、第 1 のタイプのネプツニルから 2 つの酸素を有し、2 つの CCB を形成している (図 2b 参照)。

$\text{Na}_2[(\text{NpO}_2)_2(\text{MoO}_4)_2\text{H}_2\text{O}] \cdot \text{H}_2\text{O}$  の構造には、2 つのタイプの  $\text{NpO}_2^+$  イオンが存在し、両方ともに赤道面の配位数は 5 である。図 2c に示すように、2 つの  $\text{NpO}_2^+$  イオンが部分的にペアを成し、その結果 CCI を形成している。このペアでは、1 つの  $\text{NpO}_2^+$  イオンは単座配位子として作用し、もう 1 つは単に配位中心となっている<sup>50)</sup>。

他の多くのネプツニウム(V)化合物の場合にも、 $\text{NpO}_2^+$  イオンは  $\text{NpO}_2\text{OOCH}$  におけるように相互に配位しているものが多い<sup>51)</sup>。しかし、 $\text{NpO}_2\text{OOCH}$  中の CCB は特異である。 $\text{NpO}_2^+$  イオンはダイヤモンドの格子状に結合している (図 4b 参照)。

$\text{NH}_4\text{NpO}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2.33\text{H}_2\text{O}$  の結晶構造は、単座配位子として互いに配位しあった  $\text{NpO}_2^+$  イオンの 3 量体によって特徴づけられている<sup>55)</sup> (図 4a 参照)。従って、全てのネプツニル基は 2 つの CCB に関与している。

最後に、 $(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  中の構造における CCB は次のような陽イオンネット平面で出来ている。即ち、ネプツニル基の 1 つは、他のネプツニル基からの酸素 2 個、2 つの異なるマロン酸基の酸素 2 個、及び水分子の酸素 1 つと結合した 5 方両錐、もう 1 つのネプツニル基は、1 つのマロン酸基の 2 つのカルボニル基からの酸素、他の 1 つのネプツニル基、及び 2 つの水分子の酸素 1 つずつと結合した 5 方両錐である<sup>57)</sup> (図 4c 参照)。編み目構造中の半分の  $\text{NpO}_2^+$  イオンは 2 座配位子として働き、残り半分は単座配位子である。そ

の結果全てのネプツニル基は3つのCCBを形作っている。

以上に述べたデータから、CCBはNp(V)の固体化合物中に広く存在する現象であることが分かる。事実非常にしばしば観察され、化合物の構造に強く影響している。文献42には、この問題に関し別の観点から論じてある<sup>42)</sup>。従ってここでは、Np(V)の固体化合物中におけるCCBの一般的な特徴についてまとめて示すに止める。

- 1) 研究された全ての化合物中で、CCBはネプツニル基の酸素原子を介して架橋することにより形作られる。しかし、結合したNpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンはその個性を維持しており、1つのCCB中のNp-Oの原子間距離はその長さが顕著に異なる(表1におけるL<sub>1</sub><<L<sub>3</sub>参照)。
- 2) 大多数の化合物は単座配位したCCBを含んでいる、即ちNp原子は隣のNp原子と1つのCCBを形成している。メリティック酸塩の構造中にのみ、2重に架橋したCCBが存在する。
- 3) CCBに関与しているNp原子は異なった配位多面体構造を示すが、5方両錐型(pbp)が最も一般的である(表1参照)。
- 4) CCBを形成することにより、NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオン中のNp-Oの原子間距離は明らかに長くなる。表1におけるL<sub>1</sub>とL<sub>2</sub>の差の平均値は0.04 Åである。
- 5) 配位したネプツニル基の酸素のNp-Oの原子間距離の大きさは2.33-2.54 Åの間である。L<sub>3</sub>の平均値は約2.45 Åであり、NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンの赤道面で配位している他のリガンドからの酸素との原子間距離とほぼ同じである。
- 6) NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンはCCBにおいて1つ以上4つまでの結合に関与している。この点に関し次のように表記することが出来る。<sup>1</sup>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>, <sub>1</sub>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>, <sub>1</sub><sup>1</sup>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>, <sub>2</sub>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>, <sub>2</sub>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>, <sub>2</sub><sup>1</sup>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>, <sub>1</sub><sup>2</sup>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>及び<sub>2</sub><sup>2</sup>NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>である。ここで、左上の数字はNpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンがリガンドとして関与するCCBの数であり、左下の数字は配位する近接NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンの数である。文献42に示したように、CCBを持つ化合物中におけるNpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンの別の表記法も存在する<sup>42)</sup>。
- 7) NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンによって形成されたCCBの数は、单塩から複塩になると減少し、配位圈に関与する水分子の数の増加によっても減少する。

### 3. ネプツニウム5価化合物の物性に対する

#### 陽イオン-陽イオン相互作用の影響

### 3. 1 化合物の結晶化と溶解に関する特徴

ネプツニウム(V)化合物の CCI は、化合物の性質に非常に影響する。特に、CCB を持つ多くの化合物は溶解と結晶化時の挙動に特異性を示す。多分、この現象は重合体の結晶格子形成に CCB が関与するためであろう。文献 59 に示したように、 $MNpO_2C_2O_4 \cdot nH_2O$  の分子式で表されるシュウ酸化合物は一般に非常に水に溶けやすい<sup>59)</sup>。しかし、1 日あるいはそれ以上放置後には、これらの化合物の溶解度は数分の 1 に減少する。この現象は  $MNpO_2C_2O_4 \cdot nH_2O$  の飽和溶液からの、 $(NpO_2)_2C_2O_4 \cdot 6H_2O$  のゆっくりした結晶化（沈殿と表現）の研究によって上手く説明することが出来た<sup>60)</sup>。 $(NpO_2)_2C_2O_4 \cdot 6H_2O$  がゆっくり溶解する現象は疑いなく、化合物中の CCB 重合体鎖系に起因している<sup>56)</sup>。

重合体鎖 CCB の形成による溶解度の変化の典型例は、ネプツニウム(V)のギ酸塩において認められる<sup>51,61)</sup>。過剰なギ酸で  $NpO_2OH$  を溶解した、 $[NpO_2^+] = 0.1 - 0.3 M$  の濃度の溶液は、室温で数時間は透明で存在している。その後、 $NpO_2OOCH \cdot 2H_2O$  のゆっくりした沈殿生成が始まり、その溶解度は 23 °C の 0.2 M ギ酸中で  $5.32 \times 10^{-2} M$  である<sup>61)</sup>。その溶解度は温度を 65 °C まで上げることにより顕著に変化する。 $(NpO_2)_2C_2O_4 \cdot 6H_2O$  の飽和溶液を沸騰させると、 $NpO_2OOCH \cdot H_2O$  の結晶を生じ、その溶解度は 100 °C の 0.3 M ギ酸溶液中で  $2.42 \times 10^{-2} M$  である。 $NpO_2OOCH \cdot H_2O$  は（溶液の）温度を 140 °C 以上にあげると  $NpO_2OOCH$  に変化する（訳者注：水熱法での合成による）。 $NpO_2OOCH$  を含む溶液のネプツニウム(V)の濃度観察の結果、140 – 200 °C の温度領域で、 $NpO_2OOCH$  の溶解度は  $NpO_2OOCH \cdot H_2O$  のそれと同程度か低い値を示した。

（訳者注：この論文における“溶解度”の用語は、ほとんどの場合、母液中の“Np 濃度”を指している。この章でもそのような使い方がされている。）

水和水の違いに基づく同様な現象は、ネプツニウム(V)の硫酸塩<sup>62,43,44)</sup>、酢酸塩<sup>63)</sup>、酒石酸塩<sup>64,53)</sup>及び他のカルボキシ酸塩<sup>52,57,58,65,66)</sup>の合成時に観察される。一般に、水への比較的低い溶解度ばかりでなく沈殿のゆっくりした生成や溶解は、CCB 重合体鎖系を有するネプツニウム(V)の化合物の典型的様相である。通常これらの化合物は吸湿性ではない。

### 3. 2 化合物の電子吸収スペクトル

CCI はネプツニウム(V)の化合物の光学的性質に特異的な影響を及ぼす。この結論は、構造既知の 30 種類以上のネプツニウム(V)の化合物及び複塩の電子吸収スペクトル (EAS) の測定により確立された<sup>46,47,64-73)</sup>。CCB を有する化合物と持たない化合物の EAS の比較ばかりでなく、対応する溶液の EAS とも比

較することにより、幾つかの興味ある規則性が明らかになった<sup>67,74,75)</sup>。

その第1は、化合物中のネプツニウム配位多面体に関するものである。先述したように、中心原子の典型的多面体構造は、5方両錐型であり、6方両錐型は希といえる。実験結果は、酸素原子による5方両錐型の全てのネプツニウム(V)の化合物は、そのEASの950–1050 nm領域に、強いシャープな吸収ピークを持つ(図5a参照)。もし、中心原子の多面体構造が6方両錐型の場合には、上記の領域にシープなピークは現れない(図5b参照)。この現象は簡単に説明できる。Lapportの規則によれば、配位子場が球対称の場合(centrisymmetrical)(D<sub>6h</sub>を含む)、f-f遷移は厳しく禁制される。もし、配位多面体に対称中心が存在しない場合(5方両錐型がその例である)、f-f遷移の確率は顕著に高くなり、その結果EASには対応するアクチニド化合物のシャープな吸収ピークが現れる。

ネプツニウム(V)の化合物のEASにおけるモル吸光係数は、結晶中でも溶液中でも大きくは変化しない。低い吸光係数は、Np(V)の水酸化物あるいはX線回折パターンに弱い線が観察されるだけのような結晶化度の悪い、無定形に近い化合物においてのみ観察される<sup>75)</sup>。

配位多面体にD<sub>5h</sub>対称を持つような、Np(V)の固体化合物や水和したNpO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンのEASの類似性から、希薄溶液中のネプツニルイオンの水和数(h)は疑いなく5であると結論できる。幾つかの文献には<sup>30,34,76)</sup>、hは6または4と仮定されている。これらの仮定は、違っていると考えるべきである<sup>77)</sup>。同様の結論は、AmO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンを含む他のアクチニルイオンについても真実である。これらを含む溶液のEASには、f-f遷移に伴うシャープな吸収が観察される。更に、EASに及ぼす配位多面体の対称性の影響は、固相ネプツニル化合物とプルトニル化合物で類似している。これに関しては、プルトニルのシュウ酸複塩のEASにより実証されている<sup>78)</sup>。従って、他のアクチニルイオンと同様に、プルトニルイオンの水和数は5である。

EASに観察されるNp(V)の化合物の、D<sub>5h</sub>対称Np配位多面体に起因する主ピークは、しばしばスプリットすることがある<sup>65,68,70,73)</sup>(図6参照)。これは化合物の構造中に等価でないネプツニル基が存在することを示している。しかし、逆にスプリットが認められないからと言って、結晶格子中の全てのネプツニル基が等価であるとは言えない。例えばNpO<sub>2</sub>OOCC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>·1.75H<sub>2</sub>O中には4種類のネプツニル基が存在する<sup>53)</sup>が、そのEASには単一ピークが観察される<sup>64)</sup>。

対称中心のないNp配位多面体を持つ化合物のEASにおける、主吸収ピークは(対応する錯体の溶液の吸収ピークに比べ)通常長波長側へシフトする。シフトの大きさは、CCIの存在や配位子としてのネプツニル基の化学的性質によって決まる。CCIが存在しない場合、化合物結晶と対応する錯体溶液のEAS

のピーク位置はほとんど変化しない。シフトの大きさ ( $\Delta \lambda_m$ ) は 5 nm を超えない（表 2 参照）。

化合物の構造中に CCB が存在する場合は、上述した様相とは異なる。この場合には、固体ネプツニル化合物の主吸収ピークは（対応する錯体溶液の EAS のピーク位置から）長波長側へ大きくシフトする。 $\Delta \lambda_m$  の値は、 $\text{NpO}_2^+$ の相互作用の性格に依存する。もし、ネプツニル基が単座配位子の場合には、 $\Delta \lambda_m$  の値は 8・17 nm の領域である（表 3 参照）。ネプツニル基が 2 座配位子として作用している化合物の場合には、 $\Delta \lambda_m$  の値は 15・39 nm の領域である（表 4 参照）。幾つかの Np(V) 化合物には、結晶格子中にネプツニル基が単座配位子及び 2 座配位子の両方で存在する場合がある。このような化合物の EAS は主ピークが長波長側へスプリットした形になる。Np(V) のマロン酸塩 4 水和物の EAS はこの現象に対する典型的な例である<sup>53)</sup>。

Np(V) 化合物の EAS の系統的な研究から、幾つかの不自然な事実が明らかになった。その 1 つは、Np(V) のクロム酸塩のスペクトルに関するものである<sup>71)</sup>。この化合物の EAS には強いブロードなピークが観察され、非常に大きく長波長側へシフト ( $\Delta \lambda_m > 40$  nm) している。X 線による構造解析の結果は、Np(V) のクロム酸塩のスペクトルは CCI と無関係であることを示している<sup>79,80)</sup>。多分、 $\text{CrO}_4^-$  陰イオンが高い酸化能力を有するため、この化合物中では Np からリガンドに対し部分的な電荷移動が起こっているためと考えている。

もう 1 つの異常は 5 酸化 2 ネプツニウムの結晶の EAS に観察される<sup>81)</sup>。このスペクトルもブロードな複雑なピークを示し、赤外領域へ大きくシフトしている（図 7 参照）。多分、 $\text{Np}_2\text{O}_5$  の構造中に含まれる、ネプツニル基の Np-O 結合が顕著に弱められている証拠であろう。

更に、上述した規則性に加えて、Np(V) 化合物の EAS の測定により、化合物中の CCI の存在やその性質を予言できる可能性があることを付け加えておくことが必要であろう。このような予言は、塩化物<sup>73)</sup>、シュウ酸塩<sup>72)</sup>、マロン酸塩<sup>65)</sup> 及び酒石酸塩<sup>64)</sup> を含む多くの Np(V) 化合物で成された。全ての場合に、この予言が引き続いて実施された、X 線による構造解析の結果成功裏に実証された<sup>45,53,55,57,58)</sup>。勿論、このような予言は一般的特性を示し得るだけである。EAS の測定は、その他の研究手段で置き換えられるほどの価値があるがやはり、Np(V) 化合物の構造解析研究の第 1 ステージであると考えるべきである。

### 3. 3 化合物の赤外線及びその他のスペクトル

文献 82 に、多くの Np(V) の単純塩中の  $\text{NpO}_2^+$  の IR スペクトルには、非対称振動に起因する非常に強いブロードなバンド ( $\nu_{as}$ ) が観測され、その化合物

を特徴づけることができるなどを述べた<sup>82)</sup>。この特性は、これらの化合物中に、ネプツニル基の酸素と水分子の間に水素結合が存在することを仮定することにより説明できる。しかし、構造に関する研究からは、今や Np(V)の単純塩中には CCB が存在するのが普通であることが分かっている。従って、非対称振動に起因するバンド ( $\nu_{as}$ ) は化合物中の CCI によると結論しても良いことになる。この結論は、構造既知の Np(V)化合物についての IR スペクトルの系統的研究により確認された<sup>51,64-66)</sup>。Np(V)化合物中に、CCI が存在するかしないかでの  $\nu_{as}$  の型の違いを図 8 に示す。

CCB を持つ Np(V)化合物の IR スペクトルのもう 1 つの特徴は、 $\nu_{as}$  の低振動数側へのシフトである。Np-O 間の距離の変化及び EAS の  $\Delta\lambda_m$  と  $\nu_{as}$  のシフトとの相関を表 5 に示す。残念ながら、IR スペクトルの  $\nu_{as}$  は CCB を持つ場合ブロードであり且つシフトしているので、吸収位置を正確に決めるのが難しく、上述の相関は定性的なことしか導けない。一方、Np-O 間の距離は狭い範囲で変化するだけなので、望ましい精度で測定することは出来ない。

CCB を持つ Np(V)化合物のメスバウア分光（ロシアでは NRG と略称されている。NRG : Nuclear Gamma ray Resonance）に関する情報を限られた数の刊行物にみることが出来る<sup>43,51,86)</sup>。しかし、CCI に起因する顕著な効果はこれらの研究では観測されていない。

#### 4. 他のアクチニドイオンの固体化合物中の

##### 陽イオン-陽イオン相互作用

$UO_2^{2+}$ イオンの相互配位は、まず、無水塩化ウラニルの結晶構造中に粉末中性子回折法により観察された<sup>87)</sup>。この化合物は斜方晶系格子であり、 $NpO_2ClO_4 \cdot 4H_2O$  中にみられる  $NpO_2^+$ イオンのジグザグ構造のような、 $UO_2^{2+}$ イオンの構造を持っている。全てのウラニル基が单座配位子として働き、それぞれ 2 つの CCB を形成している。

同様な無限遠のジグザグ構造は、 $UO_2MoO_4$  にも見いだされている<sup>88)</sup>。更に、 $UO_2EO_4$  (E = S, Se, Cr, Mo 及び W) の全ての無水塩は、同じ構造であることが、X 線のデータに基づいて明らかになっていることは述べておく必要がある。従って、これらの化合物中には疑いなく同様な CCB が存在する。

$UO_2^{2+}$ イオンの相互配位のもう 1 つのタイプは、 $UO_2(C_5HF_6O_2)_2$  (U(VI) のヘキサフルオロアセチルアセトン錯体) の構造中に現れる<sup>89)</sup>。この化合物の格子は、 $NH_4NpO_2C_2O_4 \cdot 2.33H_2O$  中の構造のように、3 つの等価でないウラニ

ル基がサークルを形成している。

その他のウラニル化合物の構造中ではまだCCBの存在は確認されていない。しかし、ここまでお分かりのように、リガンドとしての配位能力が大きくな陰イオンによる無水のU(VI)塩の幾つかにCCBが存在する。

ウラニル及びネプツニル化合物中のCCIの性質と働きは同じである。両方の場合に、CCBは架橋する酸素により形成され、アクチニル基の酸素とは非常に異なる原子間距離を有している( $L_1 \ll L_3$ ; 表6参照)。 $UO_2^{2+}$ イオンのU-O原子間距離も、CCBの形成により著しく延びる。 $L_1$ と $L_2$ の差の平均値は0.06 Åである。他のウラニル基の赤道面に配位した“yl”酸素(アクチニル基( $O=An=O$ )<sup>2+</sup> or +の酸素を指す)のU-O原子間距離は平均2.51 Åであり、他の酸素リガンドによるウラニル錯体の場合より幾分大きい。従って、 $UO_2^{2+}$ イオンはCCBの形成に際しては、比較的弱い配位子であると結論して良いであろう。

$Np(V)$ とU(VI)以外の他のアクチニル(V)の固体化合物において、CCBの存在は知られていない。 $UO_2MoO_4$ と多分同型であろう $NpO_2MoO_4$ 調整の試みは、 $Np(V\,I)$ の5価への還元が起こり成功していない。

## 5. アクチニドの固体化合物中及び溶液中の 陽イオン-陽イオン相互作用の比較

上述したように、溶液中の5価アクチニド元素のCCIの色々な様相に関する報文は非常に多い。CCIの本質に関する研究は特に興味あるものである。ある研究者等は、CCIを $AnO_2^+$ と“活性な”陽イオンとの間の未成就の「レドックス」反応であると考える<sup>7,12,13,19,21</sup>。この仮説に付いて激しい議論が戦わされた。しかし、一連の研究<sup>24,27-33</sup>の結果、この考え方は疑いなく誤りであることがはつきりした。最終的に、CCIは $AnO_2^+$ と“活性な”陽イオンとの間の錯形成過程の一段階であることが確立された。しかし、その過程の特質は依然不明のまま残されている。

濃い $Np(V)$ の溶液を用いた何回かの測定の結果により、フランスの科学者等は、水分子やそこに存在する陰イオンのような中間のリガンドを介した、 $NpO_2^+$ の相互配位の一過程であることを提案した<sup>24,28,31</sup>。この見解は、 $Np(V)$ の固体化合物中のCCIを考えると、正しくないように見える。事実、結晶中のCCB形成は全ての場合に、 $NpO_2^+$ の“yl”酸素が隣のネプツノイル\*の配位圏内圈まで直接入り込むことにより、実現している。一方、溶液中と固相化合物中のアクチニルイオンのCCIの間には明らかな類似性が認められる。溶液中と固

相化合物中のアクチニルイオンの CCI の EAS を比較すると（その類似性は）特にはっきりする。固相でも液相でも、吸収ピークのシフト量はほぼ同じである。Np(V)の濃度が高い過塩素酸溶液中と固体の  $\text{NpClO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  中の Np(V)の CCI における Np—Np の原子間距離は、互いに非常に近く約 4.2 Å である。従って、全ての結果が溶液中と固相化合物中のアクチニルイオンの CCI は類似の課程で進行していることを推測させる。しかし、これらの課程の詳細は、個々の場合に以下のように異なっている：

- 1) Np(V)の固体化合物中の CCB はしばしば、重合体系を形成する。溶液中の CCI は通常、單一分子型または 2 量体型の錯体を形成する。
- 2) Np(V)の固体化合物の構造に関する系統的研究を通し、化合物中の結晶水数の増加により CCI の弱化が誘発され、2 座配位  $\text{NpO}_2^+$  の相互作用が单座配位に変わることが多くなるのが明らかにされている。この現象は固体化合物中と（類似の錯塩からなる）液相への変化においてより強く現れる。この現象は  $\text{NpO}_2^+$  の “yl” 酸素と水分子との間の水素結合形成により説明可能である。この仮説は水より弱いプロトン供給能を持つ溶媒で水を置換した場合に、CCI がより強くなることにより確認することが出来る。

以上から、液相及び固相におけるアクチノイルイオンの CCI は共に、 $\text{AnO}_2^+$  の内圏における“活性な”陽イオンとの間の錯形成過程であると結論できよう。個々の差違は相互作用の強さに起因している。

\* (訳注) ネプツニウムの 5 価及び 6 価の呼び方について：Neptunyl(V)、Neptunyl(VI)という呼び方と、5 価に Neptunoyl、6 価に Neptunyl、併せて “yl” と呼ぶ方法がある。ロシアでは後者が一般的であり、Krot 教授は後者を使うことが多い。

## 6. 1997年以降の概要

### 6. 1 1997年以降に合成された5価ネプツニウム化合物

1997年以降で、5価ネプツニウムの陽イオン-陽イオン結合を持つ化合物に対する報告例は多くない。表7に、1997年以降に報告された5価ネプツニウム化合物を纏めて掲げた<sup>90-96</sup>。化合物中にCCBを持つものは僅かしか報告されていない<sup>90,95</sup>。構造が明らかになったものも少ない<sup>90,95,96</sup>。

構造が明らかになったもので、CCBを持つ化合物の1つは、 $(\text{NpO}_2)_2(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ であり、構造は図1のd型であるが、ネプツニル基は交互に僅かに異なった構造を持つ2サイトからなっている<sup>90</sup>。しかし、メスパウアスペクトルで分解可能なほど大きな差はないことも明らかになっている<sup>91</sup>。この化合物については、磁性に関する結果も報告されており、4.5 Kで強磁性体転移すること、及び異なる2サイトに対応し2段階の磁化挙動を示すことが見いだされている<sup>97,98</sup>。

$[(\text{NpO}_2)_2(\text{SO}(\text{CH}_3)_2)_7(\text{H}_2\text{O})_2](\text{ClO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>95</sup>は、 $[(\text{NpO}_2)_2(\text{SO}(\text{CH}_3)_2)_7(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ イオンの2量体を含み、過塩素酸基とイオン結合を形成した化合物である。2量体のそれぞれは異なった配位多面体を形成し、CCB結合している。それぞれの配位多面体は5方両錐型であるが、いずれも歪んでいる。2つの配位多面体の中心を成しているネプツニウム原子間の距離は4.252 Åと比較的近いが、隣の2量体のネプツニウム原子までの距離は、6.638 Åである。電子吸収スペクトルは、ピーク位置が986.5と995.0 nmにはっきりと分裂したスペクトルを示し、この結果からも2つのネプツニウムサイトがかなり異なっていることが窺える<sup>95</sup>。

$[\text{NpO}_2(\text{PO}(\text{C}_6\text{H}_5)_3)_4]\text{ClO}_4$ は、5価ネプツニウム化合物には珍しい四方両錐型の構造をしているが、構造中にCCBは存在しない<sup>92</sup>。

$\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{NpO}_2[(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は、5価ネプツニウムの中性溶液中でフタル酸濃度が0.1 M以上の場合、リガンドとネプツニウムの比が1:1以上の錯体が形成されるが、一番可能性の高い錯イオンは $\text{NpO}_2[(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4]_2^{3-}$ であろう、という仮定に基づいて合成されたものである。0.1 M過塩素酸溶液中で、ネプツニウムはほぼ完全に沈殿する。構造中にCCBは存在しないが、 $[\text{NpO}_2[(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4]_2]_{n^{3-}}$ イオンがフタル酸リガンドを介して直鎖状に連続し、この鎖は結晶水により水素結合されている。 $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ イオンは8面体構造であり、陰イオンの鎖の間に位置している<sup>93</sup>。

一連のプロピオン酸塩が合成され、その諸性質が報告された<sup>94</sup>。報告された4種類のプロピオン酸塩はいずれもその構造中に、CCBが存在することは各種のスペクトル測定により確実であるが、単結晶合成は未だ成功していないため、構造は明らかにされていない。

最近、 $[NpO_2\{OC(NH_2)_2\}_5]ClO_4 \cdot H_2O$  と  $[NpO_2Cl\{OC(NH_2)_2\}_4]$  の組成を持つ化合物が合成され報告された<sup>96)</sup>。いずれの化合物も、配位多面体は 5 方両錐型であるが、化合物中に CCB は存在しない。 $[NpO_2\{OC(NH_2)_2\}_5]ClO_4 \cdot H_2O$  は、赤道面に 5 つの尿素分子が酸素により配位した陽イオンと過塩素酸基とがイオン結合したものである。結晶水はネプツニル基の 1 つの酸素と水素結合し、酸素間距離は 2.79 Å とかなり近くに存在する。 $[NpO_2Cl\{OC(NH_2)_2\}_4]$  は、赤道面に 4 つの尿素分子が酸素により配位し、更に 1 つの塩素原子が配位して 5 方両錐型構造を形成している<sup>96)</sup>。

構造既知の 5 価ネプツニウム化合物を用いて、500-750 nm (可視領域) の吸収スペクトルと構造の関係を明らかにしようとする試みが報告された<sup>98)</sup>。980 nm 付近に吸収を示さない対象性の良い配位多面体を持つ、6 方両錐型及び 4 方両錐型の錯体は、共に水和した  $NpO_2^+$  イオンの吸収が 617 nm に現れるが、CCI によるその長波長側へのシフトは 980 nm 付近の吸収と比べ非常に小さく、構造との関連を議論する測定手段には不向きであった。

## 6. 2 メスバウア分光による研究

前述の3、3では、メスバウア分光とCCBにはあまり重要な相関はないと述べられているが、1980年代までの論文の引用結果についてのことである。ここでは、最近の論文に基づいて簡単に紹介する。

5価ネプツニウム化合物のメスバウアスペクトルは、図9に示すように、大別すると4種類になる。①高温領域まで大きな磁気分裂を示すもの、②液体ヘリウム温度近くでも磁気緩和が認められるもの、③この2者の混合状態を示すもの、④明らかに2種類のネプツニウムサイトが存在することを示すものである<sup>100)</sup>。5価ネプツニウム化合物のメスバウアスペクトルデータが蓄積されると共に、その異性体シフトの値には化合物中のネプツニウムの周りの酸素の配位数に起因する系統性が在ることが明らかになってきた<sup>100,101)</sup>。8配位化合物の異性体シフト領域は分散がやや広いが、7配位化合物の異性体シフト領域は非常に狭い範囲に集中する。従って、古くから知られていながら構造が分かっていなかった化合物に対しても新たな情報を得ることが可能になった。例えば、酢酸ネプツニル中のネプツニウムの配位数については、7配位している部分と、8配位の部分の2つのサイトがある<sup>100)</sup>ことや、無定型に近い水酸化ネプツニル中のネプツニウムは明らかに酸素7配位である<sup>101)</sup>ことなどである。更に、凍結溶液を用いることにより、5価ネプツニル( $\text{NpO}_2^+$ )の水溶液中の水和数は5であることや、硝酸ネプツニル(V) ( $(\text{NpO}_2)_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )の2つのサイトを分離して解析可能であることも報告されている<sup>102)</sup>。

## 参考文献

- 1) J. C. Sullivan, J. C. Hindman, A. J. Zielen : J. Am. Chem. Soc., 1961, 83(16), 3373–3378. “Specific interaction between Np(V) and U(VI) in aqueous perchloric acid media”.
- 2) J. C. Sullivan : J. Am. Chem. Soc., 1962, 84(22), 4256 – 4259. “Complex ion formation between cations. Spectra and identification of a Np(V)-Cr(III) complex”.
- 3) R. K. Murman, J. C. Sullivan : Inorg. Chem., 1967, 6(5), 892–900. “The fomation of a neptunium(V)-rhodium(III) complex. Kinetics and equilibria in acid solutions”.
- 4) T. W. Newton, F. B. Baker : Inorg. Chem., 1962, 1(2), 368.
- 5) G. Gordon : Inorg. Chem., 1963, 2(6). 1277–1280. “Oxygen-18 tracer studies on the reduction of uranyl ion by chromium(II)”.
- 6) T. W. Newton, M. J. Burkhart : Inorg. Chem., 1971, 10(10), 2323–2326. “The preparation and properties of chromium(III)-plutonium(V) complex”.
- 7) A. G. Rykov, A. A. Frolov : Radiokhimiya, 1975, 17(2), 187 – 189. “Spectrophotometric study of the interaction of americium(V) ions with uranium(VI) ions”.
- 8) J. C. Sullivan : Inorg. Chem., 1964, 3(3), 315–319. “The formation of a neptunium(V)-chromium(III) complex. Kinetics and equilibria in perchlorate solutions”.
- 9) R. K. Murmann, J. C. Sullivan : Inorg. Chem., 1967, 6(5), 892–900. “The formation of a neptunium(V)-chromium(III) complex. Kinetics and equilibria in acid solutions”.
- 10) J. C. Sullivan, R. C. Thompson : Inorg. Chem., 1967, 6(10), 1795 – 1798. “The reduction of cobalt(III) by Np(V) and Np(V)-Cr(III) complex”.
- 11) J. C. Stullivan, M. J. Burkhart : J. Phys. Chem., 1968, 72(7), 2675-2677. “A kinetic study of the system  $^{237}\text{Np(V)}$  Cr(III)- $^{239}\text{Np(V)}$ ”.
- 12) A. G. Rykov, A. A. Frolov : Radiokhimiya, 1972, 14(5), 709–717. “A spectrophotometric study of the complex formation and solvation of actinide ions. IV. Neptunium(V) interaction with the ions of uranium(VI), iron(III) and thorium(IV)”.

- 13) A. G. Rykov, A. A. Frolov : Radiokhimiya, 1972, 14(5), 717–721. “A spectrophotometric study of the complex formation and solvation of actinide ions. V. Neptunium(V) interaction with iron(III) ions in mixed solutions”.
- 14) A. Ekstrom, Y. Farrar : Inorg. Chem., 1972, 11(11), 2610 – 2615. “Kinetics and mechanism of the formation of the chromium(III)-uranium(V) binuclear complex”.
- 15) C. Lavallee, T. W. Newton : Inorg. Chem., 1972, 11(11), 2616 – 2620. “Kinetics of the reaction between chromium(III)-plutonium(V) complex and Pu(III) in aqueous perchlorate solutions”.
- 16) A. Ekstrom : Inorg. Chem., 1973, 12(10), 2455 – 2460. “Kinetics and mechanism of the decomposition of the uranium(V)-chromium(III) complex and of its reaction with excess chromium(II)”.
- 17) A. Ekstrom : Inorg. Chem., 1974, 13(9), 2237 – 2241. “Kinetics and mechanism of the disproportionation of uranium(V)”.
- 18) A. G. Rykov, A. A. Frolov : Radiokhimiya, 1974, 16(6), 803 – 810. “Investigation of the redox reactions of actinide elements. 29. Kinetics of a neptunium(V)-iron(II) reaction in the presence of uranium(VI) and indium(III) ions”.
- 19) A. A. Frolov, A. G. Rykov : Radiokhimiya, 1974, 16(4), 556 – 557. “A spectrophotometric study of the interaction of neptunium(V) ions with indium(III) ions”.
- 20) E. J. Hinderberger, R. C. Thompson : Inorg. Chem., 1975, 14(4), 784 – 785. “Reaction of chromium(III)-neptunium(V) complex by neptunium(III)”.
- 21) A. A. Frolov, A. G. Rykov : Radiokhimiya, 1975, 17(2), 287 – 291. “Investigation of the interaction of neptunium(V) with high charged ions”.
- 22) A. A. Frolov, A. G. Rykov : Radiokhimiya, 1976, 18(1), 58 – 64. “The influence of active and neutral cations on the kinetics of the redox reactions with the participation of neptunium(V) ions”.
- 23) D. G. Karraker, J. A. Stone : Inorg. Chem., 1977, 16(11), 2979 – 2980. “Moessbauer spectra of Np(V)-Cr(III) and Np(V)-Rh(III) complexes”.
- 24) C. Madic, B. Guillaume, J. C. Morisseau, J. P. Moulin : J. Inorg Nucl. Chem., 1979, 41(7), 1027 – 1031. “Cation-cation complexes of pentavalent actinides. 1. Spectrophotometric study of complexes between neptunium(V) and  $\text{UO}_2^{2+}$  and  $\text{NpO}_2^{2+}$  ions in aqueous perchloric

and nitric solutions".

- 25) V. A. Vodovatov, L. G. Mashirov, D. N. Suglobov : Radiokhimiya, 1979, 21(6) 830—835. "Electron donor properties of actinyl(V) ions and the peculiarities of their behavior".
- 26) B. Guillaume, D. E. Hobart, J. Y. Bourges : J. Inorg. Nucl. Chem., 1981, 43(12), 3295—3299. "Cation-cation complexes of pentavalent actinides. II. Spectrophotometric study of complexes of Am(V) with  $\text{UO}_2^{2+}$  and  $\text{NpO}_2^{2+}$  ions in aqueous perchlorate solution".
- 27) B. Guillaume, G. M. Begun, R. L. Hahn, A. H. Narten : in "11emes Jour. des Actinides, 1981, p.91". "Studies of cation-cation complexes of pentavalent actinides in aqueous perchloric solutions".
- 28) B. Guillaume, G. M. Begun, R. L. Hahn : in "Actinide-1981, p.102". "Raman spectrometric studies of cation-cation complexes of pentavalent actinides in aqueous perchloric solutions".
- 29) B. Guillaume, A. H. Narten, R. L. Hahn : in "Actinide-1981, p.105". "Investigations of cation-cation complexes of  $\text{NpO}_2^+$  solutions by large-angle X-ray scattering".
- 30) V. A. Glebov, M. F. Tikhonov : Coord. Chem., 1982, 8(1), 48—54. "Investigation of the nature of cation-cation interaction between  $\text{NpO}_2^+$  by a NMR method".
- 31) B. Guillaume, G. M. Begun, R. L. Hahn : Inorg. Chem., 1982, 21(3), 1159 — 1166. "Investigations of cation-cation complexes of  $\text{NpO}_2^+$  solutions by large-angle X-ray scattering".
- 32) B. Guillaume, R. L. Hahn, A. H. Narten : Inorg. Chem., 1983, 22(1), 109 — 111. "Investigations of cation-cation complexes of  $\text{NpO}_2^+$  solutions by large-angle X-ray scattering"
- 33) C. Madic, G. M. Begun, D. E. Hobart, R. L. Hahn : Radiochim. Acta, 1983, 34(4) 195 — 202. "Cation-cation complexes of pentavalent actinides: complexes formed by  $\text{NpO}_2^+$  or  $\text{VO}_2^+$  with  $\text{VO}^{2+}$  in aqueous perchlorate solutions".
- 34) G. V. Ionova, V. G. Pershina, V. I. Spitsyn : J. Heorg. Khim., 1983, 28(12), 3113 — 3118. "Quantum chemistry interpretation of cation-cation interactions".
- 35) V. A. Vodovatov, L. G. Mashirov : Radiokhimiya, 1984, 26(2) 264—265. "Specific character of the electron donor properties of neptunoyl ions".
- 36) V. P. Shilov, T. N. Bukhtiyarova : Radiokhimiya, 1991, 33(5), 87—91.

- “Influence of solvent nature on the complex formation of neptunium(V) with uranium(VI), thorium(IV) and iron(III)”.
- 37) A. Cousson, S. Dabos, H. Abazli, F. Nectoux, M. Pages : J. Less-Comm. Met., 1984, 99(2), 233 – 240. “Cystal structure of a neptunyl cation-cation complex ( $\text{NpO}_2^+$ ) with mellitic acid  $\text{Na}_4(\text{NpO}_2)_2\text{C}_{12}\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ”.
  - 38) A. Cousson : Acta Cyst., C, 1985, 41(12), 1758 – 1761. “Structure du bis(benzenetetracarboxylate-1,2,4,5) de pentaneptunyle(V) et de triammonium a sept molecules d'eau”.
  - 39) S. V. Tomilin, Yu. F. Volkov, R. F. Melkaya, V. I. Spiriyakov, I. I. Kapshukov : Radiokhimiya, 1986, 28(3), 304 – 311. “Crystal structure of a pentavalent neptunium compound  $\text{Cs}_4(\text{NpO}_2)_3\text{Cl}_6(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Structure of the polymer with cation-cation interaction  $\text{NpO}_2^+ \cdot \text{NpO}_2^+$ ”.
  - 40) S. V. Tomilin, Yu. F. Volkov, I. I. Kapshukov : in “Stereochemistry of the coordination compounds of pentavalent actinides, Review”, CNII Atominform, M., 1988”.
  - 41) N. N. Krot, D. N. Suglobov : Radiokhimiya, 1989, 31(6), 1 – 20. “Development of the work on the chemistry of neptunium and plutonium coordination compounds”.
  - 42) M. S. Grigoriev : “Structure chemistry of the compounds of neptunium(VII) and neptunium(V), Synopsis of thesis, M., 1995”.
  - 43) M. S. Grigoriev, A. I. Yanovski, A. M. Fedoseev, N. A. Budantseva, Yu. T. Struchkov, N. N. Krot, V. I. Spitsyn : Dokl. An. USSR, 1988, 300(3), 618 – 620. “Cation-cation interaction in neptunoyl sulfate dehydrate  $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ”.
  - 44) M. S. Grigoriev, N. A. Baturin, N. A. Budantseva, A. M. Fedoseev : Radiokhimiya, 1993, 35(2), 29 – 38. “Cation-cation interaction in neptunoyl sulfate monohydrate  $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ”.
  - 45) M. S. Grigoriev, A. A. Bessonov, N. N. Krot, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov : Radiokhimiya, 1993, 35(4), 17 – 23. “Cation-cation interaction in neptunium(V) chloride monohydrate  $\text{NpO}_2\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ”.
  - 46) M. S. Grigoriev, N. A. Baturin, A. A. Bessonov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1995, 37(1), 11-18. “Crystal structure and electron absorption spectrum of neptunoyl perchlorate tetrahydrate  $\text{NpO}_2\text{ClO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ”.
  - 47) M. S. Grigoriev, I. A. Charushnikova, N. N. Krot, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov : J. Neorg. Khim., 1994, 39(2), 179 – 183. “Crystal structure

- and electron absorption spectrum of neptunoyl nitrate  $(\text{NpO}_2)_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ".
- 48) I. A. Charushnikova, M. S. Grigoriev, N. N. Krot, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov : in 24emes Jour. des Actinides, 32—33. "Cation-cation interaction in the crystal structures of neptunium(V) nitrates".
  - 49) M. S. Grigoriev, I. A. Charushnikova, A. M. Fedoseev, N. A. Budantseva, N. A. Baturin, L. L. Regel : Radiokhimiya, 1991, 33(4), 19 — 27. "Synthesis, crystal and molecular structure of a double potassium and neptunoyl molybdate".
  - 50) M. S. Grigoriev, N. A. Baturin, A. M. Fedoseev, N. A. Budantseva : Koordin. Khimiya, 1994, 20(7), 552 — 556. "Crystal structure of a complex neptunium(V) molybdate  $\text{Na}_2[(\text{NpO}_2)_2(\text{MoO}_4)_2\text{H}_2\text{O}] \cdot \text{H}_2\text{O}$ ".
  - 51) M. S. Grigoriev, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov, A. A. Bessonov, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1989, 31(4), 37 — 44. "Cation-cation interactions in neptunium(V) formates".
  - 52) M. S. Grigoriev, I. A. Charushnikova, N. A. Baturin, N. N. Krot : J. Neorg. Khim., 1995, 40(5), 732 — 735. "Crystal structure of neptunoyl glikolate monohydrate  $\text{NpO}_2\text{CH}_2\text{OHCOO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ".
  - 53) N. N. Krot, I. A. Charushnikova, M. S. Grigoriev : in 22iemes Jour. des Actinides, 1992, pp.35 — 36. "Synthesis, structure and some properties of neptunium(V) malonates and benzoates".
  - 54) I. A. Charushnikova, V.P. Perminov, S. B. Katser : Radiokhimiya, 1995, 37(6), 493 — 498. "Crystal and molecular structure of a complex neptunium(V) acetate  $[(\text{NpO}_2)_2(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{H}_2\text{O}] \cdot \text{C}_2\text{H}_3\text{N}$ ".
  - 55) M. S. Grigoriev, A. A. Bessonov, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1991, 33(5), 46 — 53. "Crystal structure of a complex neptunium(V) oxalate  $\text{NH}_4\text{NpO}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{nH}_2\text{O}$ ".
  - 56) M. S. Grigoriev, I. A. Charushnikova, N. N. Krot, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov : J. Neorg. Khim., 1996, 41(4), 1539 — 1541. "Crystal structure of neptunoyl oxalate hexahydrate  $(\text{NpO}_2)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ".
  - 57) M. S. Grigoriev, I. A. Charushnikova, N. N. Krot, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov : Radiokhimiya, 1993, 35(4), 17 — 23. "Crystal and molecular structure of neptunoyl malonate tetrahydrate  $(\text{NpO}_2)_2\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ".
  - 58) M. S. Grigoriev, I. A. Charushnikova, N. N. Krot, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov : Radiokhimiya, 1993, 35(4), 31 — 37. "Crystal and

molecular structure of neptunoyl malonate trihydrate  $(\text{NpO}_2)_2\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ .

- 59) A. D. Gelman, V. I. Blokhin, T. N. Bukhtiyarova, N. N. Krot : J. Neorg. Khim., 1970, 15(7), 1899—2005. “On the separation of neptunium(V) complex oxalates and ethylenediaminetetraacetates in the solid state”.
- 60) V. G. Zubarev, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1981, 23(6), 857—861. “Study of the composition and properties of some neptunium(V) oxalate compounds”.
- 61) A. I. Logvis, A. A. Bessonov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1994, 36(1), 6—9. “New data on neptunium(V) formates”.
- 62) A. M. Fedosee, N. A. Budantseva, M. S. Grigoriev, T. I. Potemkina, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1988, 30(5), 607—610. “Study of the simple sulfates of neptunium(V)”.
- 63) A. A. Bessonov, M. S. Grigoriev, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1989, 31(4), 33—37. “Simple neptunium(V) acetates”.
- 64) I. A. Charushnikova, T. V. Afonasieva, V. P. Perminov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1992, 34(6), 7—16. “Simple neptunium(V) benzoates”.
- 65) N. N. Krot, I. A. Charushnikova, T. V. Afonasieva, M. S. Grigoriev : Radiokhimiya, 1993, 35(2), 14—29. “Some neptunium(V) malonates”.
- 66) I. A. Charushnikova, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1995, 37(1), 9—13. “Neptunium(V) compounds with some derivatives of acetic acid. Synthesis and properties”.
- 67) N. N. Krot, A. A. Bessonov, V. P. Perminov : Dokl. AN USSR, 1990, 312(6), 1402 — 1404. “Electron absorption spectra of neptunium(V) solid compounds”.
- 68) A. A. Bessonov, N. A. Budantseva, M. A. Fedoseev, N. A. Budantseva, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1990, 32(5), 24—31. “Electron absorption spectra of actinide(V) solid compounds. 1. Neptunium(V) sulfates and selenates”.
- 69) A. A. Bessonov, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1990, 32(5), 31—35. “Electron absorption spectra of actinide(V) solid compounds. 2. Neptunium(V) carboxylates”.
- 70) M. A. Fedoseev, N. A. Budantseva : Radiokhimiya, 1990, 32(5), 19—24. “Nptunium(V) complex molibdates”.
- 71) M. A. Fedoseev, N. A. Budantseva, M. S. Grigoriev, V. P. Perminov : Radiokhimiya, 1991, 33(4), 7 — 19. “Synthesis and study of the

properties of pentavalent neptunium and americium chromate compounds”.

- 72) A. A. Bessonov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1991, 33(3), 35 – 46. “Electron absorption spectra of actinide(V) solid compounds. 3. Neptunium(V) oxalates”.
- 73) A. A. Bessonov, T. V. Afonasieva, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1991, 33(3), 47 – 52. “Electron absorption spectra of actinide(V) solid compounds. Neptunium(V) perchlorate, chloride and nitrate”.
- 74) N. N. Krot, A. A. Bessonov, M. S. Grigoriev : 21emes Jour. des Actinides, 1991, pp.169 – 171. “Electron absorption spectra and structure of neptunium(V) solid compounds”.
- 75) A. A. Bessonov : “Electron absorption spectra of neptunium(V) crystalline compounds, Thesis, 1991”.
- 76) V. A. Glebov, T. M. Nikitina, M. F. Tikhonov : Radiokhimiya, 1977, 19(2), 277 – 278. “Investigation of  $\text{NpO}_2^+$  water solutions by NMR method”.
- 77) A. A. Bessonov, A. Yu. Garnov, N. N. Krot, V. P. Perminov : “Extend. Abst. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Nucl. Rad. Chem., St Malo, France 8 – 13 Sept., 1996, Vol. 1, C – P14 (p.4). “On hydration and solvation numbers of actinide dioxocations”.
- 78) A. A. Bessonov, N. N. Krot, N. A. Budantseva, T. V. Afonasieva : Radiokhimiya, 1996, 38(3), 223 – 225. “Electron absorption spectra of some plutonium(VI) oxalates”.
- 79) M. S. Grigoriev, N. A. Baturin, A. M. Fedoseev, N. A. Budantseva : Radiokhimiya, 1991, 33(5), 53 – 63. “Crystal and molecular structure of neptunium(V) complex chromates  $\text{CsNpO}_2\text{CrO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $(\text{NH}_4)_4(\text{NpO}_2)_2(\text{CrO}_4)_3$ ”.
- 80) 欠番 (本文ではネプツニル(V)のクロム酸塩のEASについて論じている。)
- 81) A. A. Bessonov, N. A. Budantseva, A. M. Fedoseev : 24iemes Jour. des Actinides, Austria, 15 – 19, April, 1994, pp.67 – 68. “Electron absorption spectra peculiarities of some solid Np(V) compounds”.
- 82) M. S. Grigoriev, I. Yanovski, A. M. Fedoseev, N. A. Budantseva, Yu. T. Struchkov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1991, 33(5), 46 – 53. “Synthesis, crystal and molecular structure of a complex neptunium(V) sulfate  $\text{Cs}_3[\text{NpO}_2(\text{SO}_4)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ”.
- 83) S. V. Tomilin, Yu. F. Volkov, G. I. Visyashteva, I. I. Kapshukov : Radiokhimiya, 1984, 26(3), 319 – 321. “Crystal structure of a

- pentavalent neptunium compound  $\text{NaNpO}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ".
- 84) M. S. Grigoriev, N. A. Baturin, L. L. Regel, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1991, 33(2), 19–25. "Synthesis, crystal and molecular structure of the hydrates of a complex  $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6][\text{NpO}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_2] \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $n = 3, 4$ )".
- 85) M. S. Grigoriev, A. M. Fedoseev, N. A. Budantseva, A. I. Yanovski, Yu. T. Struchkov, N. N. Krot : Radiokhimiya, 1991, 33(3), 54–61. "Synthesis, crystal and molecular structure of complex neptunium(V) sulfates  $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6][\text{NpO}_2(\text{SO}_4)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{H}_8\text{O}_3[\text{NpO}_2(\text{SO}_4)_2]$ ". : Radiokhimiya, 1995, 37(1), 11–18. "Crystal structure and electron absorption spectrum of neptunoyl perchlorate tetrahydrate  $\text{NpO}_2\text{ClO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ".
- 86) F. Nectoux, H. Abazli, J. Jove, A. Cousson, M. Pages, M. Gasperin, G. Choppin : J. Less-Comm. Met., 1984, 97(1), 1–10. "Crystal structure and Moessbauer studies of neptunium(V) complexes with polycarboxylic acids".
- 87) J. C. Taylor, P. W. Wilson : Acta Cryst., 1973, B28(5), 1073–1075. "The structure of anhydrous uranyl chloride by powder neutron diffraction".
- 88) V. N. Serezhkin, V. K. Trunov, L. G. Makarevich : Crystallographija, 1980, 25(4), 858 – 860. "Specified crystal structure of uranyl molybdate".
- 89) J. C. Taylor, A. Ekstrom, C. H. Randall : Inorg. Chem., 1978, 17(11), 3285 – 3289. "Crystal and molecular structure of trimeric bis (1,1,1,5,5-hexafluoropentane-2,4-dionato)dioxouranium(VI)".

## 1997年以降の参考文献

- 90) I. A. Charushnikova, N. N. Krot, Z. A. Starikova : Radiochem., 2001, 43(5), 434-437. "Crystal structure of neptunium(V) phthalate  $(\text{NpO}_2)_2(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ".
- 91) M. Saeki, M. Nakada, T. Yamashita, T. Nakamoto : Radiochim. Acta, 1998, 80, 89-94. "Synthesis and properties of some neptunium(V) phthalates".
- 92) I. A. Charushnikova, N. N. Krot, Z. A. Starikova : Radiochem., 2001, 43(1), 24-29. "Synthesis, crystal structure, and spectral characteristics of the Np(V) complex with triphenylphosphine oxide  $\{\text{NpO}_2(\text{PO}(\text{C}_6\text{H}_5)_3)_4\}\text{ClO}_4$ ".
- 93) I. A. Charushnikova, N. N. Krot, Z. A. Starikova : Radiochem., 2001, 43(5), 496-501. "Crystal structure and electronic absorption spectrum of double neptunium(V) phthalate  $\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{NpO}_2[(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ".
- 94) M. Nakada, T. Yamashita, T. Nakamoto, M. Saeki, N. N. Krot, M. S. Grigor'ev : Radiochem., 2002, 44(2), 103-108. "Synthesis and properties of neptunium(V) propionates".
- 95) I. A. Charushnikova, N. N. Krot, Z. A. Starikova : Radiochem., 2000, 42(5), 439-445. "Synthesis, crystal structure, and some characteristics of Np(V) complex with dimethyl sulfoxide phthalate  $[(\text{NpO}_2)_2(\text{SO}(\text{CH}_3)_2)_7(\text{H}_2\text{O})_2](\text{ClO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ".
- 96) M. S. Grigor'ev, M. Yu. Antipin, N. N. Krot, A. Yu. Garnov : Radiochem., 2002, 44(5), 458-462. "Synthesis and structure of complexes of Np(V) perchlorate and Np(V) chloride with urea".
- 97) T. Nakamoto, M. Nakada, A. Nakamura : Solid State Comm., 2001, 119, 523-526. "Magnetic study of pentavalent neptunium phthalate hexahydrate  $(\text{NpO}_2)_2(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ".
- 98) A. Nakamura : Private communication. (T. Nakamoto, M. Nakada, A. Nakamura : J. Nucl. Sci. Technol., in press. "Magnetic properties of some neptunyl(+1) complexes".)
- 99) I. A. Charushnikova, N. N. Krot, V. P. Perminov : Radiochem., 2001, 43(3), 215-216. "Absorption spectra of some crystalline Np(V) compounds in the visible range".
- 100) M. Saeki, M. Nakada, T. Nakamoto, N. M. Masaki, T. Yamashita : J. Alloys Comp., 1998, 271-273, 176-179. "Coordination chemistry of neptunyl(V) compounds by means of Moessbauer spectroscopy".
- 101) M. Saeki, M. Nakada, T. Nakamoto, T. Yamashita, N. M. Masaki, N. N.

- Krot : J. Radioanal. Nucl. Chem., 1999, 239(2), 221-225. "A correlation between isomer shifts of  $^{237}\text{Np}$  Moessbauer spectra and coordination numbers of Np atoms in neptunyl(V) compounds".
- 102) M. Nakada : Private communication. (M. Nakada, N. M. Masaki, T. Yamashita : J. Nucl. Sci. Technol., in press. "Moessbauer spectroscopic studies of  $^{237}\text{Np}$  in aqueous solutions".)

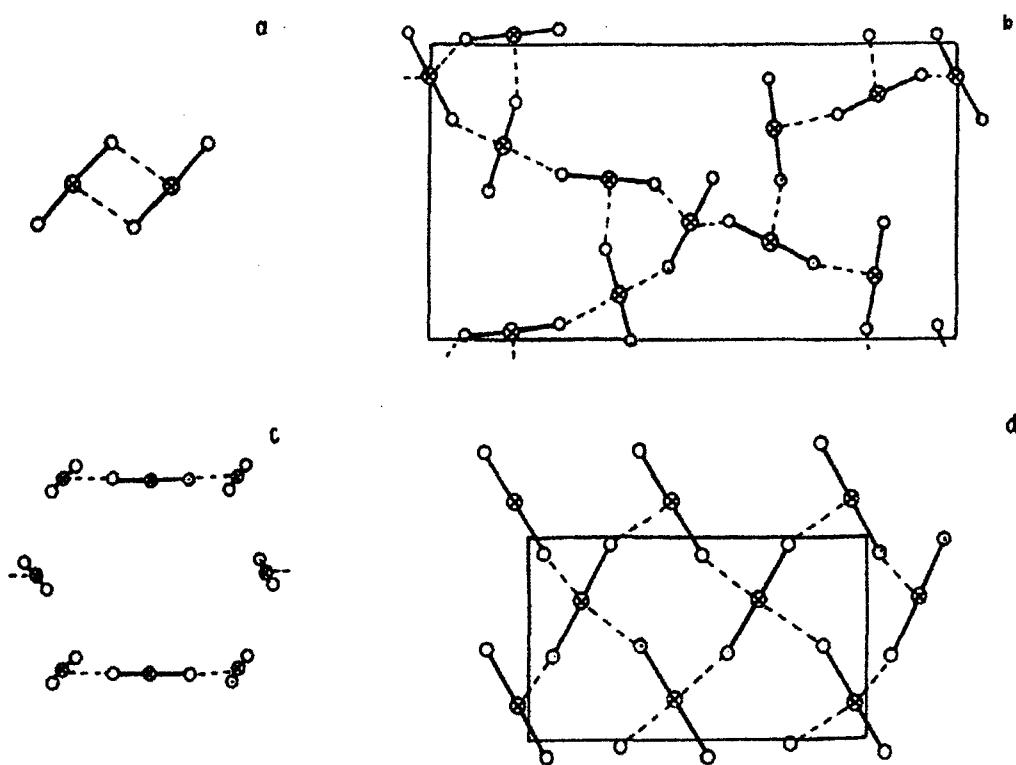


図 1 化合物の構造中における陽イオン-陽イオン結合の形式  
 (a) :  $\text{Na}_4(\text{NpO}_2)_2\text{C}_{12}\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , (b) :  $(\text{NH}_4)_3[(\text{NpO}_2)_5(\text{C}_{10}\text{H}_2\text{O}_8)_2] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  
 (c) :  $\text{Cs}_4[(\text{NpO}_2)_2\text{Cl}_4\text{NpO}_2\text{Cl}_2 \cdot (\text{NO}_3)\text{H}_2\text{O}]$ , (d) :  $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

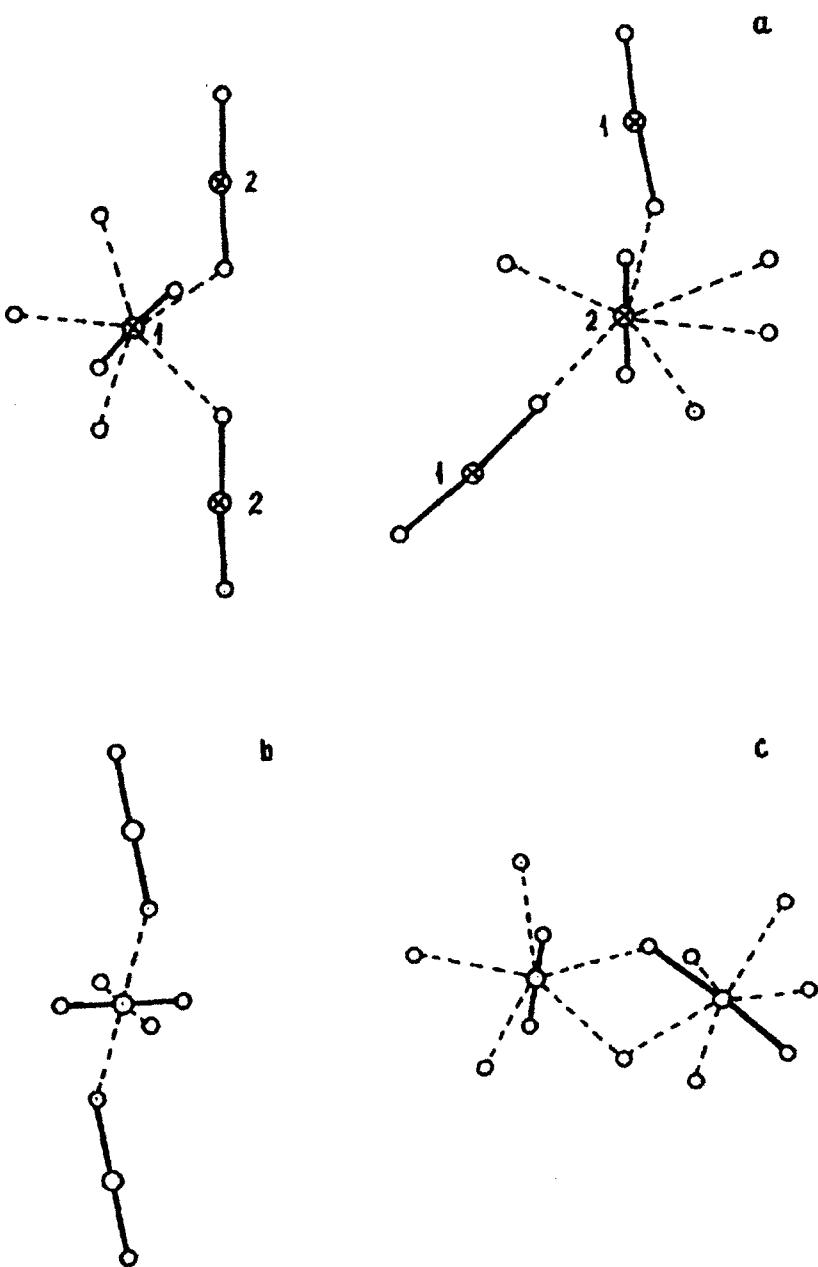


図 2 化合物の構造中における配位多面体と  
陽イオン-陽イオン結合の形式

(a) :  $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , (b) :  $\text{K}_4(\text{H}_5\text{O}_2)[(\text{NpO}_2)_3(\text{MoO}_4)_4] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  
(c) :  $\text{Na}_2[(\text{NpO}_2)_2 \cdot (\text{MoO}_4)_2\text{H}_2\text{O}] \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

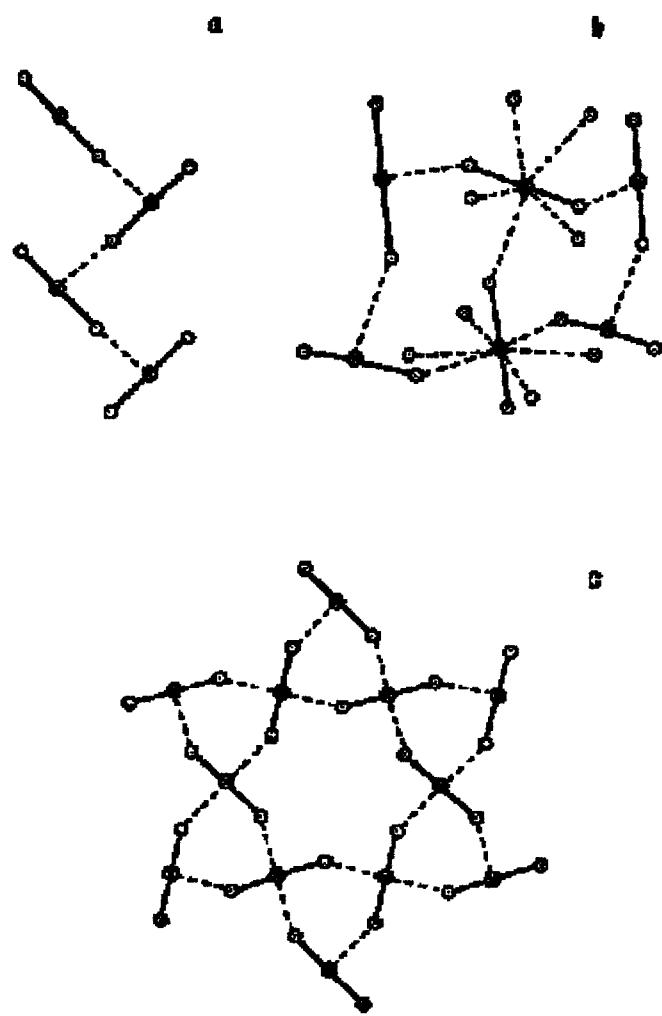


図 3 化合物の構造中における陽イオン-陽イオン結合の形式  
(a) :  $\text{NpO}_2\text{ClO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , (b) :  $(\text{NpO}_2)_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  
(c) :  $\text{La}(\text{NpO}_2)_3(\text{NO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

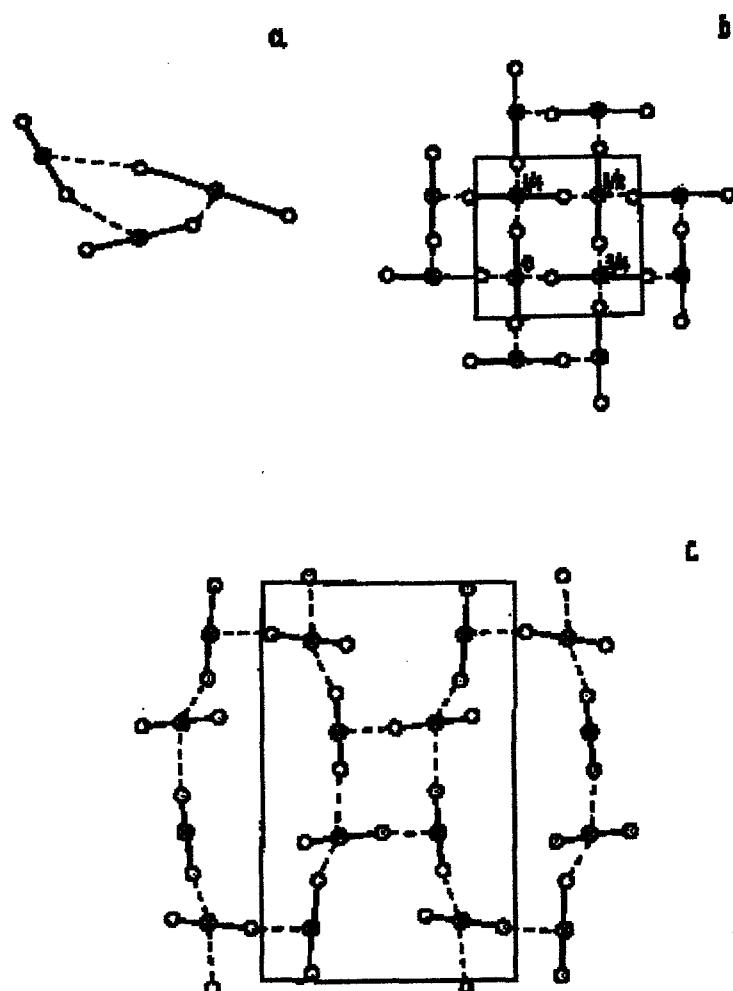


図 4 化合物の構造中における陽イオン-陽イオン結合の形式  
(a) :  $\text{NH}_4\text{NpO}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2.33\text{H}_2\text{O}$ , (b) :  $\text{NpO}_2\text{OOCH}$ ,  
(c) :  $(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

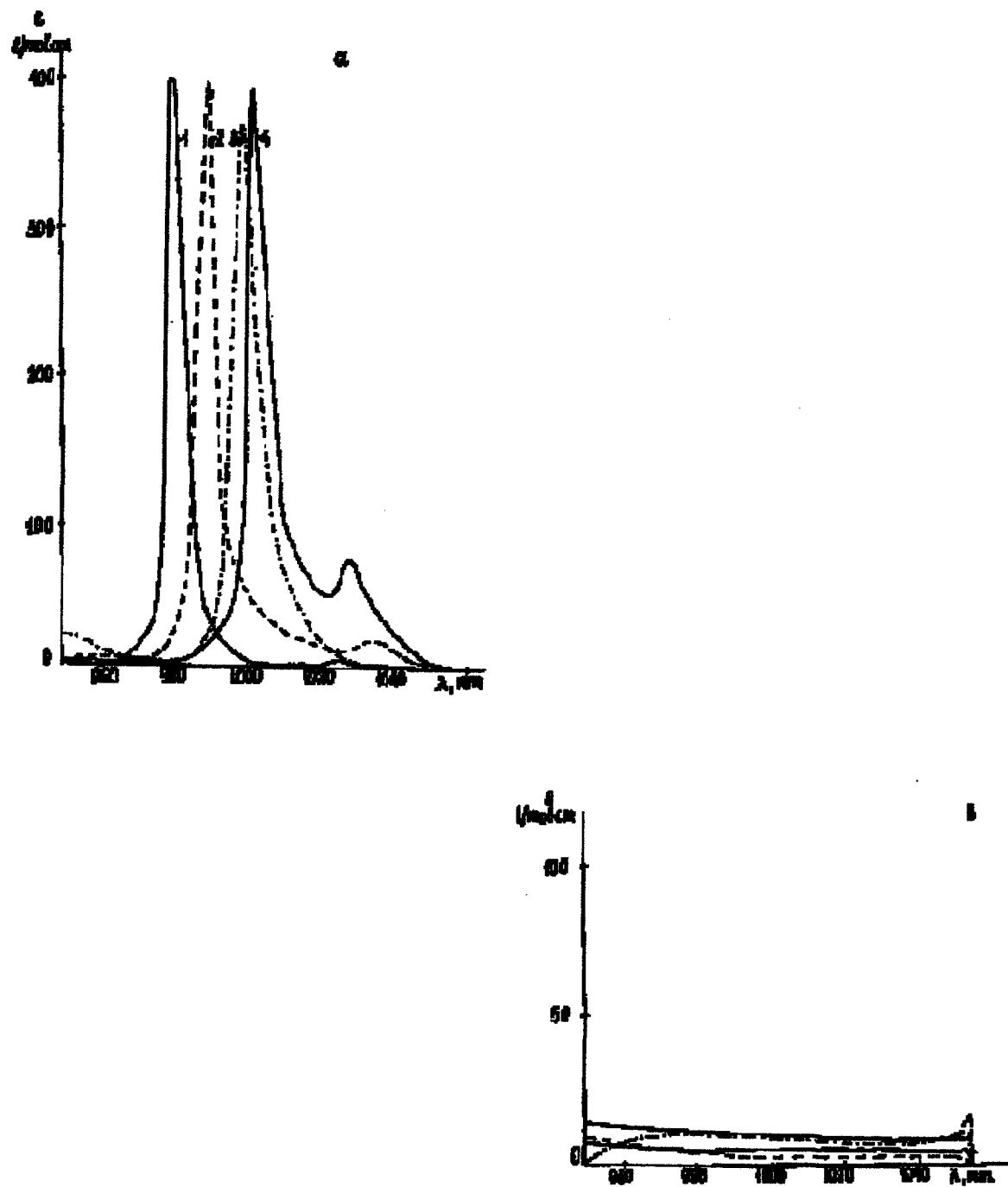


図 5 代表的化合物の電子吸収スペクトル

- a) 1-NpO<sub>2</sub><sup>+</sup> · aq, 2-NaNpO<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> · 3H<sub>2</sub>O,  
3-[Co(NH<sub>3</sub>)<sub>6</sub>]NpO<sub>2</sub>(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>2</sub> · 3H<sub>2</sub>O, 4-NpO<sub>2</sub>OOCH · H<sub>2</sub>O.
- b) 1-NH<sub>4</sub>NpO<sub>2</sub>(OOCH)<sub>3</sub>, 2-KNpO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 3-Cs<sub>2</sub>NpO<sub>2</sub>(OOCCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,  
4-La(NpO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> · 10H<sub>2</sub>O.

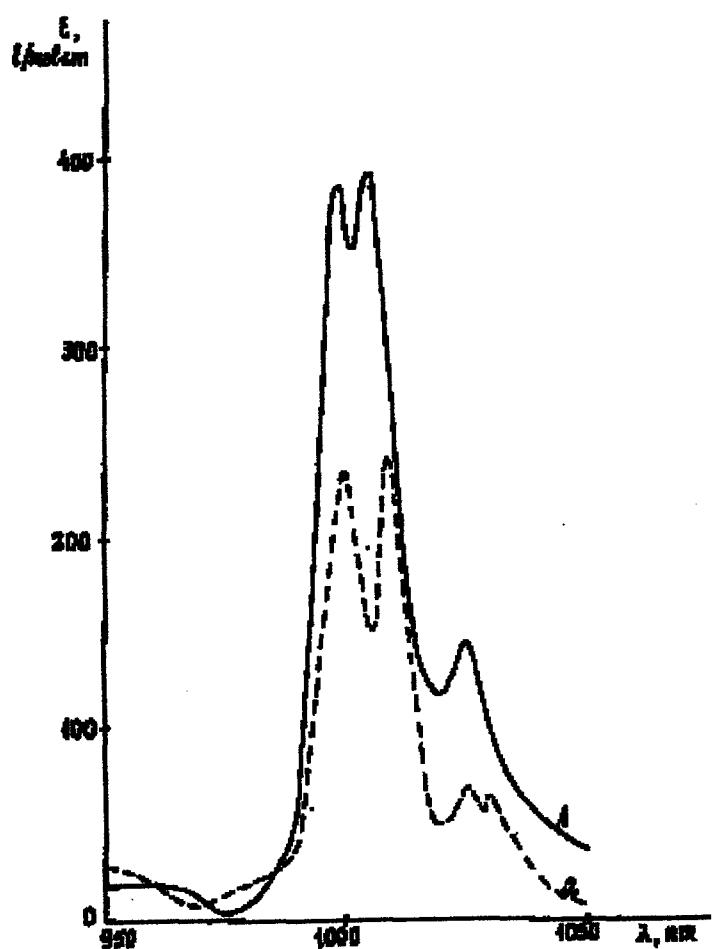


図 6  $(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (1) と  $\text{NpO}_2\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$  (2)  
の電子吸収スペクトル

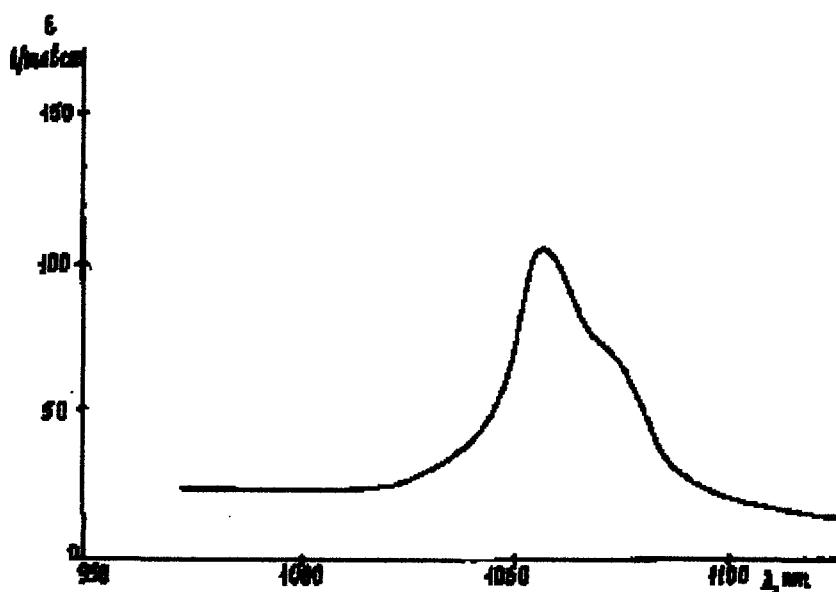


図 7  $\text{Np}_2\text{O}_5$  の電子吸収スペクトル

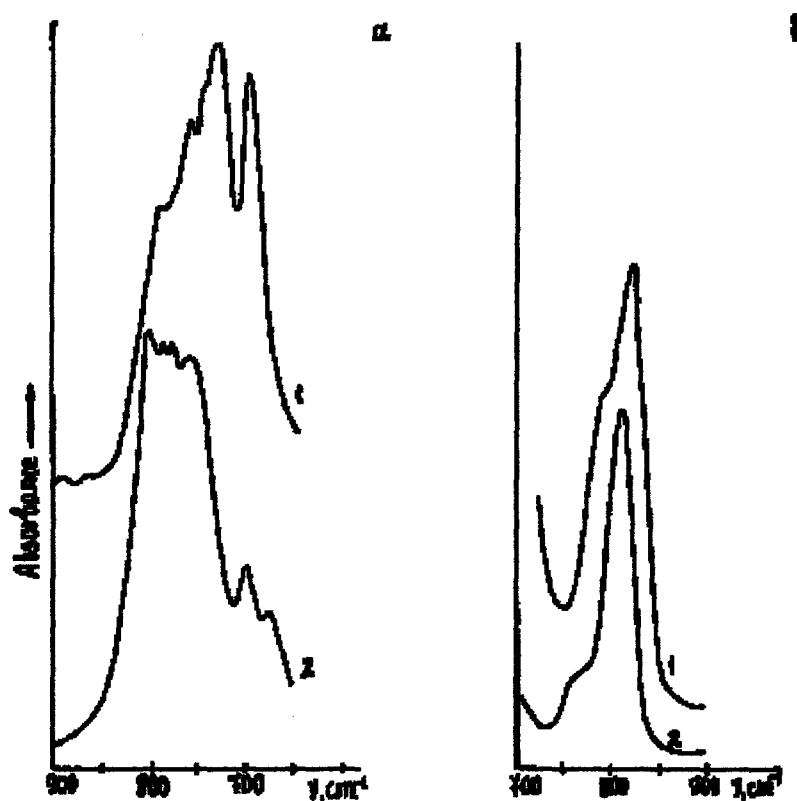


図 8 Np(V)の赤外吸収スペクトル  
a) 1-( $\text{NpO}_2$ )<sub>2</sub>( $\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4$ ) · 3 $\text{H}_2\text{O}$ , 2-( $\text{NpO}_2$ )<sub>2</sub>( $\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4$ ) · 4 $\text{H}_2\text{O}$   
b) 1- $\text{NH}_4\text{NpO}_2\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4$ , 2- $\text{CsNpO}_2\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_4$ .

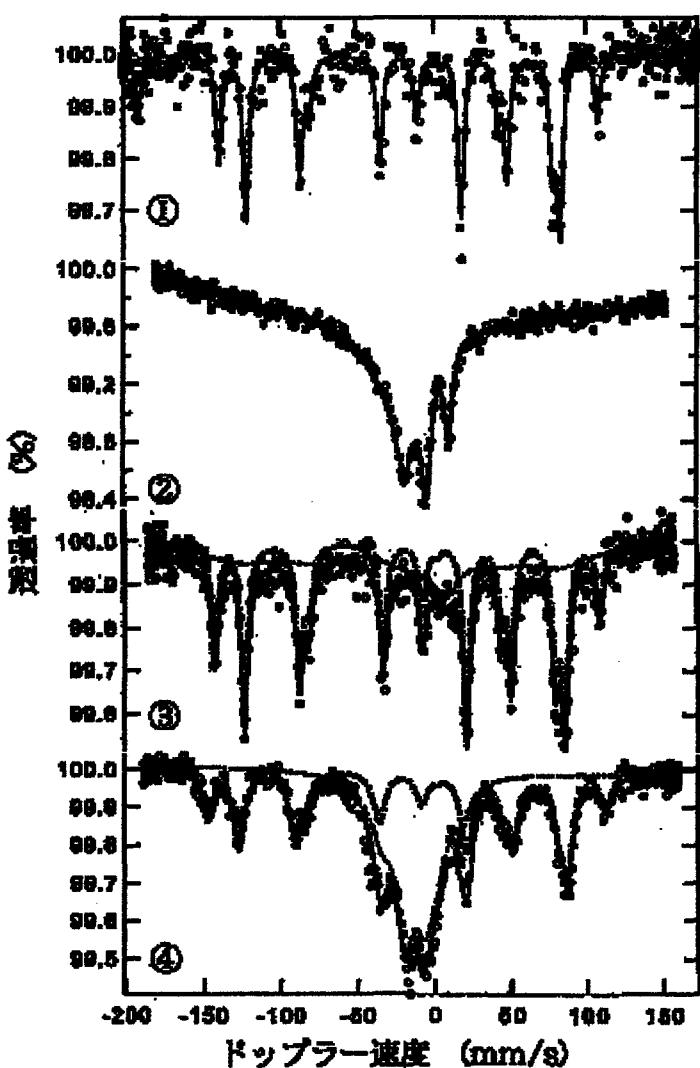


図 9 5価ネプツニウム化合物の代表的メスバウアスペクトル  
 ① :  $(\text{NpO}_2)_2(\text{OOC})_2\text{C}_6\text{H}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , ② :  $\text{NpO}_2\text{OOCH}_2\text{OCH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$   
 ③ :  $(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , ④ :  $\text{NpO}_2\text{OOCCH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

表 1 CCB を有する構造既知の Np(V)化合物

化合物の化学式	多面体構造	原子間距離 (Å)			文献
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Na <sub>4</sub> (NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>12</sub> O <sub>12</sub> · 8H <sub>2</sub> O	pbp	1.91	1.85	2.48	37
(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> [(NpO <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> (C <sub>10</sub> H <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ) <sub>2</sub> ] · 7H <sub>2</sub> O	pbp	1.873 1.876	1.804 1.806	-	38
Cs <sub>4</sub> [(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> NpO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> )H <sub>2</sub> O]	pbp	1.85	1.80	2.37	39
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	pbp	1.829 1.854	-	2.426 2.443	43
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	pbp	1.848 1.874	-	2.354 2.466	44
NpO <sub>2</sub> Cl · H <sub>2</sub> O	pbp	1.83 1.85	-	2.36 2.50	45
NpO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	pbp	1.860	1.810	2.396	46
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 5H <sub>2</sub> O	pbp hbp	1.837 1.846	1.812	2.419 2.481	47
La(NpO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> · 10H <sub>2</sub> O	hbp	1.852	-	2.417	48
K <sub>4</sub> (H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> )[(NpO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> ] · 4H <sub>2</sub> O	pbp tbp	1.900	1.844 1.846	2.393 2.394	49
Na <sub>2</sub> [(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O] · H <sub>2</sub> O	pbp	1.88	1.81-1 .83	2.54	50
NpO <sub>2</sub> OOCH · H <sub>2</sub> O	pbp	1.846 1.850	-	2.388 2.434	51
NpO <sub>2</sub> OOCH	pbp	1.857 1.915	-	2.363 2.434	51
NpO <sub>2</sub> OOCHOCH <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	pbp	1.828	1.801	2.442	52
NpO <sub>2</sub> OOCC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> · 1.75H <sub>2</sub> O	pbp	1.82- 1.87	-	2.40- 2.50	53
[(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (OOCCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O] · CH <sub>3</sub> CN	pbp sbp	1.811 1.874	-	2.334 2.473	54
NH <sub>4</sub> NpO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2.33H <sub>2</sub> O	pbp	1.886	1.824	2.364	55
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	pbp	1.858	1.830	2.392	56
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	pbp	1.840 1.842	1.828	2.436 2.477	57
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	pbp	1.840 1.87	-	2.42- 2.502	58

tbp, pbp, hbp と sbp はそれぞれ四方、五方、六方両錐及び特別両錐を表す。

原子間距離は、O=Np=O···Np の順に、L<sub>2</sub>, L<sub>1</sub> 及び L<sub>3</sub> を表している。

表 2 CCB の存在しない化合物の電子吸収スペクトルのピーク位置

化合物	ピーク位置 $\lambda$ m, nm	シフト量 $\Delta \lambda$ m, nm	参考文献
NaNpO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	989	2	72
Cs <sub>3</sub> NpO <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	986	1	68
[Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ]NpO <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	989	4	68
[Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ]NpO <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1000	4	72
[Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ]NpO <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	992	-4	72
Na <sub>2</sub> [(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O] · H <sub>2</sub> O	989	3	70

表 3 単座配位子としての NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>を含む化合物の  
電子吸収スペクトルのピーク位置

化合物	ピーク位置 $\lambda$ m, nm	シフト量 $\Delta \lambda$ m, nm	参考文献
NpO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	991	10	46
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1002	17	72
NH <sub>4</sub> NpO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2.33H <sub>2</sub> O	997	8	72
NpO <sub>2</sub> OOHOCH <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	1004	16	66
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	999	14	65

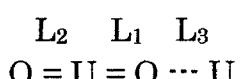
表 4 2座配位子としての  $\text{NpO}_2^+$ を含む化合物の  
電子吸収スペクトルのピーク位置

化合物	ピーク位置 $\lambda \text{ m, nm}$	シフト量 $\Delta \lambda \text{ m, nm}$	参考文献
$(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	999, 1005	17,23	68
$\text{NpO}_2\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$	1000, 1009	19,28	73
$\text{NpO}_2\text{OOCH} \cdot \text{H}_2\text{O}$	1003	21	69
$\text{NpO}_2\text{OOCH}$	1008	26	69
$\text{NpO}_2\text{OOCC}_6\text{H}_5 \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$	1009	27	64
$(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1006, 1015	21,30	65
$(\text{NpO}_2)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1007, 1021	25,39	68
$(\text{NpO}_2)_2\text{SeO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1007, 1019	25,37	68
$(\text{NpO}_2)_2\text{CH}_2(\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1007	22	65
$(\text{NpO}_2)_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	996	15	47

表 5 Np(V)化合物の EAS の吸収位置と Np-O 距離及び  
NpO<sub>2</sub><sup>+</sup>の  $\nu_{as}$  との相関

化合物	$\lambda m, nm$	Np-O 距離 Å	$\nu_{as} cm^{-1}$	文献
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	999, 1005	1.830, 1.851	768, 760	62
NpO <sub>2</sub> Cl · H <sub>2</sub> O	1000, 1009	1.835, 1.870	768	73
NpO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	991	1810, 1850	808, 776	75
NpO <sub>2</sub> OOCH · H <sub>2</sub> O	1003	1.846, 1.850	764	51
NpO <sub>2</sub> OOCH	1008	1.857, 1.915	740	51
NpO <sub>2</sub> OOCHOCH <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	1004	1.828, 1.801	802	66
NpO <sub>2</sub> OOCC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> · 1.75H <sub>2</sub> O	1009	1.82-1.87	745	64
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	999, 1007	1.840, 1.828	805, 765	65
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	1006, 1015	1.840, 1.870	760, 725	65
NaNpO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	989	1.85, 1.86	836, 804	83
Cs <sub>3</sub> NpO <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	986	1.817, 1.823	822	82
[Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ]NpO <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	989	1.811, 1.841	815	85
[Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ]NpO <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	991	1.832, 1.836	790, 780	84
NH <sub>4</sub> NpO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2.33H <sub>2</sub> O	997	1.825, 1.887	794	55

表 6 ウラニル化合物中の CCB における U-O 距離



化合物	U-O 距離 Å			文献
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
UO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	1.78	1.73	2.52	87
UO <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	1.808	1.758	2.508	88
UO <sub>2</sub> (C <sub>5</sub> HF <sub>6</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	1.79 1.72 1.81	1.72 1.68 1.71	2.47 2.54 2.48	89

表 7 1997年以降に報告された Np(V)化合物

化合物の化学式	多面体構造	原子間距離 (Å)			文献
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (OOC) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	pbp	1.85	1.85	2.44	90, 91
[NpO <sub>2</sub> (PO(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ]ClO <sub>4</sub>	tbp	no CCB*	1.80	2.44	92
Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> NpO <sub>2</sub> [(OOC) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	pbp	no CCB*	1.83	2.44	93
NpO <sub>2</sub> OOCC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> · H <sub>2</sub> O	pbp	CCB**	-	-	94
NpO <sub>2</sub> OOCC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> · 2H <sub>2</sub> O	pbp	CCB**	-	-	94
NH <sub>4</sub> (NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (OOCC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	pbp	CCB**	-	-	94
Cs(NpO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (OOCC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	pbp	CCB**	-	-	94

原子間距離は、O=Np=O···Np の順に、L<sub>2</sub>, L<sub>1</sub> 及び L<sub>3</sub> を表す。すなわち、L<sub>1</sub> は CCB に関与しているネプツニル基の Np=O 結合距離を示す。CCB が無い場合 L<sub>3</sub> は Np 赤道面の値を示した。

\* no CCB : 陽イオン-陽イオン結合を含まない。

\*\*CCB の存在は確実であるが、構造を決定するに至っていない。

This is a blank page.

# 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	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
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	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
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
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 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。
- 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。
- 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。
- EC閣僚理事会指令では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。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

## 換算表

力	N( $=10^5$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

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

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

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

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1	0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

