

国際化学オリンピックにおける 放射化学および核化学に関する出題 —第 26 回から第 50 回

Questions Regarding Radiochemistry and Nuclear Chemistry at International Chemistry Olympiad (IChO) Contests for High-School Students: The Twenty-sixth to the Fiftieth IChO

薬袋佳孝

MINAI, Yoshitaka

International Chemistry Olympiad (IChO) has been annually held since 1968. This study is the second trial of intensive analysis and quality evaluation on the questions on radiochemistry and nuclear chemistry appeared in the series of IChO contests from the 26th to the 50th.

1. はじめに

国際化学オリンピック International Chemistry Olympiad, IChO は各国(地域)から派遣された高校生を対象としての化学の国際イベントとして、1968 年以來参加国の持ち回りではほぼ毎年開催されて来た [1]。前報 [2] では、IChO の前半期 (IChO 1 から IChO 25) に出題された放射化学 radiochemistry/核化学 nuclear chemistry に関する設問を対象として、出題意図と内容についての具体的分析から、出題の特徴やその社会的背景の解明に当たった。

本報では、前報に引き続き形で IChO 26 から IChO 50 に至るいわば IChO 後半期の出題例を対象として、出題意図と内容の分析結果を中心に、出題の特徴や社

会的背景について報告する。特に、日本開催の IChO 42 (2010 年) および日本初参加の IChO 35 (2003 年) については分析結果の詳細も含めて報告する。

2. 方法

IChO-International Information Centre (IChO-IIC) 公式 web [3] 上の IChO 50 (2019 年) までの出題と解答に基づいて、内容並びに出題意図の分析に当たった。問題内容や出題意図の解析については、ホスト国が準備して、IChO に各国から派遣された学識経験者等の代表による jury meeting で認証された英語表記の問題を対象とした。また、事前にホスト国より配布され IChO 各国代表の強化などに用いられる準備問題集についても同様の分析を試みた。

3. 結果と考察

IChO 50 までに出版された放射化学関連の問題の題材を表 1 に記す。前報で取り上げた IChO 25 までについては 3 回の IChO で出題があったのみであるが[2]、IChO 26 以降では大幅に出題機会が増えている。25 回の IChO のうち 11 回で放射化学について出題されている。

出題原案の作成は開催国に委ねられているので、表 1 に記した IChO 開催国の共通性についても検討を加えた。しかし、地理的属性や社会的特徴などに特に共通の属性は認められなかった。放射化学の応用領域は原子力発電などのエネルギー分野から医学領域を含む広い範囲に及ぶため、一部の先進国を除くと、参加国それぞれに応用領域の拡大が進行中である。このため、各国の化学教育カリキュラムに放射化学の基礎に関する内容が継続的に取り入れられて来たことを反映しているとみられる。

前報で報告した IChO 16、21、25 のうち、特に IChO 16、21 では問題の背景に関する記述を含めて相当の長文の出題となっていた [1]。年代測定やトレーサー技術などのある程度専門性の高い内容が出題されたことを反映してのものである。これに対して、放射化学の基礎概念を扱った IChO 25 の出題は簡明な構成となっている。高等学校レベルの化学に放射化学分野の基礎である放射壊変、放射線の

表 1. IChO での放射化学関連の出題概要 (IChO 1 から IChO 50)。

| 回 | 年次 | 開催地 | 出題概要 |
|----|------|-----------------------------|--|
| 16 | 1984 | フランクフルト、西独 | ^{14}C 法および Rb-Sr 法による放射年代測定 |
| 21 | 1989 | ハレ、東独 | ^{32}P の放射性トレーサー利用による無機反応機構の解明 |
| 25 | 1993 | バルージア、イタリア | ^{131}I の放射壊変の数的取扱 |
| 26 | 1994 | オスロ、ノルウェー | ウラン系列の放射壊変で生成する放射性核種 |
| 28 | 1996 | モスクワ、ソ連 | ラザフォードによる放射壊変を利用したのアボガドロ数の決定 |
| 30 | 1998 | メルボルン、オーストラリア | ^{210}Pb 法による年代測定および ^{67}Ga の製造 |
| 31 | 1999 | バンコク、タイ | トリウム系列天然放射性核種 |
| 33 | 2001 | ムンバイ、インド | モナズ石中の ^{238}U と ^{232}Th |
| 35 | 2003 | アテネ、ギリシア | 核反応、ミュオン |
| 41 | 2009 | ケンブリッジ、英 | ラザフォードによる放射壊変を利用したのアボガドロ数の決定 |
| 42 | 2010 | 東京、日本 | レイリーによるアルゴンの発見とラムゼーによるヘリウムの発見 |
| 47 | 2015 | バクー、アゼルバイジャン | ^{18}F で標識したグルコース誘導体 FDG を用いる核医学診断 |
| 49 | 2017 | ナコーンパトム、タイ | ^{59}Fe の製造 |
| 50 | 2018 | プラチスラヴァ、スロバキア およびブラハ、チェコ | ^{64}Cu の製造 |

性質、半減期などの概念が徐々に取り込まれて来たことを反映したものである。

IChO 26 以降では放射化学の出題は全体として増えているが、出題内容についての解説を含む長文の問題はそれほど増加してはいない。むしろ、IChO 25 の出題例にみられるような基礎概念についての簡明な問題が目立つ。長文の出題は、IChO が想定している標準的な高校化学カリキュラムの範囲を超えた出題にみられることが多い。これに対して、簡明な出題は、高校化学カリキュラムの内容に含まれている事柄が出題されていることを示している。以下、前者の例として IChO 42 (2010, 東京)、後者の例として IChO 35 (2003, アテネ) を取り上げ、問題内容の詳細分析を試みたので、その結果を示す (表 2.3)。なお、IChO 35 で日本は IChO に初参加、IChO 42 では初開催と、それぞれに日本のコミットメントの深まりを象徴する IChO であった。

第 42 回 IChO での出題 (Problem 1)

1 In 1894, Lord Rayleigh reported that the mass of chemically prepared
 2 nitrogen was different from that of nitrogen extracted from the
 3 atmosphere, as shown in Tables 1 and 2. Later, this difference was
 4 attributed to the presence of argon in atmospheric nitrogen. The masses of
 5 gases were measured by using a glass vessel with a known volume under
 6 atmospheric pressure ($1.013 \cdot 10^5$ Pa).

7

8 Table 1. Mass of Chemical Nitrogen in the Vessel

| | |
|--|----------|
| From nitric oxide | 2.3001 g |
| From nitrous oxide | 2.2990 g |
| From ammonium nitrite purified at a red heat | 2.2987 g |
| From urea | 2.2985 g |
| From ammonium nitrite purified in the cold | 2.2987 g |
| Mean | 2.2990 g |

9

10 Table 2. Mass of Atmospheric Nitrogen in the Vessel

| | |
|--|----------|
| O ₂ was removed by hot copper (1892) | 2.3103 g |
| O ₂ was removed by hot iron (1893) | 2.3100 g |
| O ₂ was removed by ferrous hydrate (1894) | 2.3102 g |
| Mean | 2.3102 g |

11

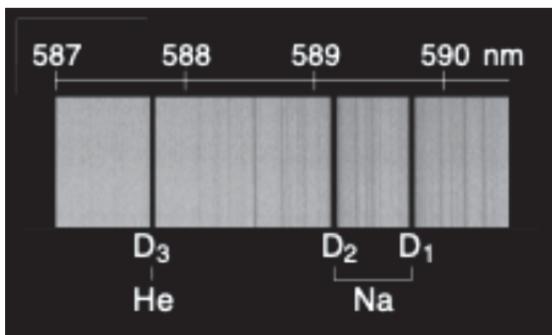
12 1.1 省略

13 1.2 省略

14

15 Ramsay and Clève discovered helium in cleveite (a mineral consisting
 16 of uranium oxide and oxides of lead, thorium, and rare earths; an impure
 17 variety of uraninite) independently and virtually simultaneously in 1895.
 18 The gas extracted from the rock showed a unique spectroscopic line at

19 around 588 nm (indicated by D3 in Figure 1), which was first observed in
 20 the spectrum of solar prominence during a total eclipse in 1868, near the
 21 well-known D1 and D2 lines of sodium.



22

23 Figure 1. Spectral lines around 588 nm

24

25 1.3 省略

26 1.4 省略

27 1.5 Which equation explains the occurrence of helium in cleveite among
 28 [A] to [D] below? Mark one.

29 · [A] $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + \alpha$

30 · [B] $\text{UHe}_2 \rightarrow \text{U} + 2\text{He}$

31 · [C] $^{240}\text{U} \rightarrow ^{240}\text{Np} + \beta^-$

32 · [D] $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{95}\text{Y} + ^{139}\text{I} + 2\text{n}$

33 Argon is also found in minerals such as malacon.

34 1.6 Which equation explains the occurrence of helium in cleveite among
 35 [A] to [D] below? Mark one.

36 [A] $\text{ArF}_2 \rightarrow \text{Ar} + \text{F}_2$

37 [B] $\text{ArXe} \rightarrow \text{Ar} + \text{Xe}$

38 [C] $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \varepsilon / \beta^+$ (electron capture / positron emission)

39 [D] $^{126}\text{I} \rightarrow ^{126}\text{Ar} + \beta^-$

40

41 One of the strongest evidences for the monoatomicity of argon and
42 helium is the ratio of the heat capacity under constant pressure to that at
43 constant volume, $\gamma = C_p / C_v$, which is exactly 5/3 (1.67 ± 0.01) for a
44 monoatomic gas. The ratio was derived from the measurement of speed of
45 sound v_s by using the following equation, where f and λ are the frequency
46 and wavelength of the sound, and R , T , and M denote the molar gas
47 constant, absolute temperature, and molar mass, respectively.

$$48 \quad v_s = f \lambda = (\gamma RT / M)^{1/2}$$

49 For an unknown gas sample, the wavelength of the sound was
50 measured to be $\lambda = 0.116$ m at a frequency of $f = 3520$ Hz ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$) and
51 temperature of 15.0°C and under atmospheric pressure ($1.013 \cdot 10^5$ Pa).
52 The density ρ of the gas for these conditions was measured to be $0.850 \pm$
53 0.005 kg m^{-3} .

54

55 1.7 省略

56 1.8 省略

57 1.9 省略

IChO 42 は初めての日本開催である。このため、IChO 前年のシラバス案の各国への提示と配布、続いての準備問題集の各国への提示と配布、そして、IChO 会期中には、出題最終案の jury meeting への提示と出題の確定、各国 jury による翻訳版の作成とその管理、contest 当日の配布と答案の回収、採点と集計、採点結果の jury meeting への提示と最終結果の発表などの作業が必要であった。このため、開催国の実施主体として（公社）日本化学会を中心に実行委員会を設け、その責任で各プロセスを進めた。本報で提示した出題は IChO 42 の会期の冒頭の jury meeting を経て確定した英文の出題内容である。実際に各国代表が解いた問題は各国 jury に寄る翻訳版である。

なお、筆者は日本代表の選抜と強化を継続的に担当していたため、開催国である日本の作題プロセスには全く関与していない。本報をまとめるに当って、改めて出題内容を精査したが、化学史の展開を踏まえた上で化学の様々な領域をカバーした総合的な良問との評価に至った。その中に放射化学に関する設問が2問含まれていたのは、20 世紀の化学史の展開における放射化学の重要性を新たに認識させるものであった。

表 2 に IChO 42 で放射化学に関する設問が出題された Problem 1 についての内容分析の結果を示す。問題文に付した行番号で注目箇所を示すこととして、内容や出題意図に関する分析結果をコメントとして記した。

分析対象の Problem 1 は筆記試験の最初の設問である。日本では 20 世紀末から IChO 出場選手の選考のための資料とすることを目的として、筆記試験および実技試験による高校化学グランプリ（現在の化学グランプリ ChGP）を実施してきた。その第 1 問は総合化学（ないしは一般化学）についての出題として、化学の広範な領域に広がる総合的な内容とすることが試みられてきた。

IChO 42 の出題構成は、長めではあるが論理的な記述を軸として、その前後に設問を配置するという構成である。このスタイルは当時の ChGP の出題構成と相似している。ChGP では、高校カリキュラムの内容を越える部分を含む出題の際には、背景説明も含めて、出題内容に関する詳細な解説を加えるのが一般的であった。直接には一定時間の中で問題を解く上での助けになることを目的としたものであるが、後年に過去の出題例を学習するなどの際にも、化学の魅力が伝わる記述となることを願ってのものである。日本での IChO の初開催の機会に、ChGP でのこうした作問経験が生かされたものと推察される。

放射化学に関する設問は 1.5 および 1.6 である。ただし、その前後には分析化学・物理化学・無機化学などの数々の設問も配され、全体として、様々な分野にまたがる総合的な出題としての構成となっている。

まず、設問 1.1 および 1.2 で問われているように、当時は未知元素であった Ar が空気中に検出されたことから問題は始まる。化学的性質に基づく分離と重量分析という古典的な手法の組み合わせで空気中の未知元素 Ar の存在が示されたこ

表 2. IChO 42 (2009) 筆記問題第 1 問についてのコメント

| 行番号 | 注目箇所 | コメント |
|----------|--------------------------|--|
| 1 から 10 | 問全体の導入部 | Rayleigh による Ar の発見 (1894) についての記述。化学反応で発生した N ₂ の質量 (Table 1) と空気から抽出した N ₂ の質量 (Table 2) に違いがあることから、空気には未知の気体 (アルゴン, Ar) が含まれているという結論に至る。自然現象の理解のためにどのように科学的なアプローチがとられるのかを学ぶ教材ともなっている。 |
| 12 及び 13 | 設問 1.1 及び設問 1.2 | 気体の状態方程式および物質量の概念に基づく計算問題。いずれも基礎的な内容である。 |
| 15 から 23 | 設問 1.3 への導入部 | Ramsay 及び Clève による cleveite 中の He の発見 (1895)。太陽プロミネンスの 588nm (1868 年の皆既日食時に発見) 付近の発光の原因でもある。 |
| 25 及び 26 | 設問 1.3 及び 1.4 | 588nm 付近の発光 D ₃ の波長-エネルギー間の換算についての計算問題。 |
| 27 から 32 | 設問 1.5 | cleveite 中の ⁴ He の生成についての出題。 ²³⁸ U の α 壊変が原因であり、放射化学分野からの出題である。天然放射能に題材を求めた応用問題で、ホットアトム化学 (反跳化学) に関わる出題でもある。 |
| 33 から 39 | 導入部 1 行と設問 1.6 | Cleveite 中の ⁴⁰ Ar の生成についての出題。 ⁴⁰ K の EC 壊変が原因であり、放射化学分野からの出題である。天然放射能に題材を求めた応用問題で、ホットアトム化学 (反跳化学) に関わる出題でもある。 |
| 41 から 53 | 設問 1.7 から設問 1.9 についての導入部 | 定圧熱容量と定積熱容量の比を利用した分子構造の推定.特に希ガスの一原子性の根拠として |
| 55 から 57 | 設問 1.7 から設問 1.9 | モル密度の計算、定圧熱容量と定積熱容量の比の計算に基づく分子構造の推定などが出題内容であり、物理化学ないしは無機化学に関する設問である。直接には放射化学についての出題とは言えないが、放射壊変によって生成した安定核種の存在状態を推定する内容とすることも出来る。ホットアトム化学 (反跳化学) の延長上にあるトピックスを扱った出題とも解釈される。 |

とが、具体的なデータを含めて述べられる。分析化学が導いた希ガスの化学の始まりについての設問である。

設問 1.3 は、分光学的データに基づいての太陽プロミネンス中の He の存在の検証についての出題である。続いての設問 1.4 は分光学的データから導かれる He のエネルギーレベルについての出題で、物理化学的な説明が物質の性質を理解する上で重要であることを物語る。

天然では Ar や He といった希ガスは特に空気中に広く分布しているのだが、その起源は何かというのが設問 1.5 および 1.6 である。いずれも放射化学に関する

出題である。放射壊変に伴って生成した安定核種である ^{40}Ar あるいは ^4He が鉱物中に長期間に渡って蓄積され、化学分析で検出出来るレベルにまで達した状態も想定しての出題である。そして、設問 1.7 から 1.9 の Ar あるいは He が鉱物中に蓄積された際にどのような化学的形態ないしは構造をとるのかという出題につながって行く。物理化学ないしは無機化学に関する出題であるが、放射壊変で生成した化学種がどのような状態で蓄積して行くかを問う放射化学関連の問題でもある。

以上のように、放射化学に関する設問である 1.5 および 1.6 は、問題前半の分析化学あるいは物理化学（分光化学）と後半の希ガスの物理化学（構造化学）あるいは無機化学についての設問をつなぐ重要な役割を演じている。このような出題をみると、放射化学が他の化学の基盤分野と同様に、近現代の化学の先端を支えていることがよく分かる。

全体として、本問題を読み解くと、分析化学/地球化学/放射化学/無機化学/物理化学についての基礎理解の深さが複合的かつ総合的に問われているように思われる。問題を解くのは各国代表クラスの優秀な高校生であることを考えると、そのレベルに相応しい総合的な良問として高く評価される。

しかし、事前に配布された準備問題の中に放射化学関連分野の設問を予想させるものは無い。これは、標準的な高校化学カリキュラムの延長上にある設問として、天然放射能である ^{40}K の EC 壊変による ^{40}Ar （設問 1.5）や α 壊変による ^4He （設問 1.6）の自然環境での蓄積が出題されたことを意味している。放射化学と地球化学の境界領域にまたがる設問であり、それぞれの分野では全く基礎的な知識を組み合わせる高度な内容の問題にまとめ上げた所に、この出題の妙味があると言えよう。

その後の日本での IChO の開催は第 53 回大会（2021 年）となる。この大会は新型コロナウイルスの感染の国際的な広がりのため、オンラインでの大会となった。放射化学関連のテーマとしては、安定同位体組成が異なる有機化合物の化学が Q2 Isotope Time Capsule と題されて取り上げられている。放射化学の関連領域である同位体化学の方法が有機地球化学/環境化学の分野に新しい領域を切り

開いていることを意識しての出題とみられる。本報では対象とする IChO を第 50 回までに留めたため、これ以上の議論は控えることとするが、放射化学の分野で開発された手法や考え方が地球化学の分野の発展に大きく貢献して来たことを示すものである。同様の事例が IChO の出題には数多くみられる。例えば、前報で取り上げた IChO 16 では C-14 法および Rb-Sr 法による年代測定が出題されているが、これらの放射年代測定と呼ばれる手法は放射化学と地球化学の境界領域で発達して来た手法である。まさに、放射化学の考え方や手法が地球化学の発展に大きく貢献した典型的な事例と言えよう。

これに対して、日本にとっては初参加となった IChO 35 (2003 年開催) ではまた別のスタイルでの放射化学関連の問題が 2 問出題されている。セクション A (一般化学) の Question 10 とセクション B (物理化学) の Question 25 である。まず、前者の問題とその分析結果を記す。

第 35 回 IChO での出題 (セクション A : 一般化学)

- 1 QUESTION 10
- 2 Identify particle X in each of the following nuclear reactions:
- 3 a) ${}^{68}_{30}\text{Zn} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{65}_{28}\text{Ni} + \text{X}$ alpha (), beta (), gamma (), neutron ()
- 4 b) ${}^{130}_{52}\text{Te} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{131}_{53}\text{I} + \text{X}$ alpha (), beta (), gamma (), neutron ()
- 5 c) ${}^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}\text{Bi} + \text{X}$ alpha (), beta (), gamma (), neutron ()
- 6 d) ${}^{23}_{11}\text{Na} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + \text{X}$ alpha (), beta (), gamma (), neutron ()
- 7 e) ${}^{19}_9\text{F} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{20}_9\text{F} + \text{X}$ alpha (), beta (), gamma (), neutron ()

続いて、コメントを記す (表 3)。

表 3. IChO 35 (2002) 筆記問題 Section A, Question 10 についてのコメント

| 行番号 | 注目箇所 | コメント |
|-----|------|---|
| 3 | 核反応 | 反応系の質量数の和は $68+1=69$ 。質量保存則から放出粒子の質量は 4 なので、 α 線放出 |
| 4 | 核反応 | 反応系の質量数の和は $130+2=132$ 。質量保存則から放出粒子の質量は 1 なので、中性子放出 |
| 5 | 核反応 | 質量数は変わらないが、原子番号が増えるので β 壊変 |
| 6 | 核反応 | 質量数、荷電ともに変化がないので、 γ 線放出 |
| 7 | 核反応 | 質量数、荷電ともに変化がないので、 γ 線放出 |

セクション A：一般化学 Question 10 は一般化学 24 問の内の一つである。同位体についての設問は同位体比に関する計算問題が Question 12 として出題されているが、安定同位体のみに関する問題であるため、こちらは本報では省略する。Question 10 は核反応についての基礎的な出題である。反応系と生成系とで質量数の和及び荷電数の和が一定に保たれることから、放出粒子を推定する設問である。

核反応は放射性核種の合成に必須であり、現代では放射性医薬品の製造や核医学への応用に不可欠の技術とされている。IChO では第 30 回メルボルン大会で ^{67}Ga の製造が取り上げられたが、放射性核種の分離と精製に主眼が置かれた出題であり (表 1)、核反応式自体が出題された例は無かった。IChO 35 で原子核とその変化自体が基礎化学に関する一般的な出題の一つとして出題されたことは、化学とその応用領域においても、原子核の変換が基礎的な概念の一つとして認識されるようになって来たことを意味している。放射化学教育の現代化のエポックともとれる事象である。

なお、核反応の重要な応用である放射性核種の製造については、IChO 35 以後、第 47 回 (^{18}F)、第 49 回 (^{59}Fe)、第 50 回 (^{64}Cu) の IChO で出題されている (表 1)。これらの核種はいずれも核医学・放射線医薬品学の分野で標識化合物として利用されている。医療分野は放射化学の代表的な応用分野の一つであり、放射性核種の需要が急速に拡大している分野である。そうした社会的な状況も IChO の出題頻度の増加と関係しているのかもしれない。

一方、ミュオンについての出題は放射化学/核化学における新しい分野として注目されて来た中間子化学に関するもので、IChO で取り上げられるのも初めてである。まず、問題文は以下の通り。

第 35 回 IChO での出題 (セクション B：物理化学)

- 1 PROBLEM 25 MUON
- 2 The muon (μ) is a subatomic particle of the lepton family which has same
- 3 charge and magnetic behavior as the electron, but has a different mass and
- 4 is unstable, i.e., it disintegrates into other particles within microseconds

- 5 after its creation. Here you will attempt to determine the mass of the muon
 6 using two rather different approaches.
- 7 a) The most common spontaneous disintegration reaction for the muon is:
 8
$$\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu,$$

 9 where ν_e is the electron antineutrino, and ν_μ the muon neutrino. In a
 10 given experiment using a stationary muon, $\nu_e + \nu_\mu$, carried away a
 11 total energy of 2.000×10^{12} J, while the electron was moving with a
 12 kinetic energy of 1.4846×10^{11} J. Determine the mass of the muon.
- 13 b) Many experiments have studied the spectroscopy of atoms that have
 14 captured a muon in place of an electron. These exotic atoms are formed
 15 in a variety of excited states. The transition from the third excited state
 16 to the first excited state of an atom consisting of a ^1H nucleus and a
 17 muon attached to it was observed at a wavelength of 2.615 nm.
 18 Determine the mass of the muon.

続いて、コメントを記す（表4）。

表4. IChO 35 (2002) 筆記問題 Section B, Problem 1 についてのコメント

| 行番号 | 注目箇所 | コメント |
|--------|--------|---|
| 2から6 | 説明文 | ミュオンの性質と問題についての説明。負ミュオンを想定した設問であるが、正ミュオンも物性研究などで使われて来たので、この問題で取り上げているのが負ミュオンであることを明記することが望ましい。 |
| 7から12 | 項目 (a) | ミュオンの質量はエネルギーに換算できるので、ミュオンから生成した電子の質量に相当するエネルギーとニュートリノが担うエネルギーの総和としてミュオンの質量が等価のエネルギーとして算出できる。 エネルギー質量等価式についての理解が必要である。 |
| 13から18 | 項目 (b) | ミュオン（負ミュオンを前提とする）は、電子の代わりに、 ^1H の原子核との相互作用で ^1H 原子状の中性原子を形成する。高校生はボーア模型などに基づく水素の原子構造を標準的な高校カリキュラムで学習していることから、普通の水素原子の原子スペクトルの波長を求めることは可能である。 正答に至るためには、電子の質量をミュオンの質量に置き換えた場合の原子スペクトルの波長が2.615nmであることに気づく必要がある。 |

このように、セクション B：物理化学 Problem 25 は μ 中間子（ミュオン）についての設問である。ミュオンが電子と同様にレプトンの一種であることに始まる説明文の後、ミュオンの質量を求めるための二つの方法が説明され、それぞれの方法で質量を算出することが出題内容である。ミュオンについては、IChO 参加国の標準的な高校化学カリキュラムでは全く取り上げられていないため、解答に必要な説明文が必要となる。また、開催国から各参加国に事前に配布される準備問題集にも参考となるような内容が含まれるのが普通である。

ミュオンの質量を求める方法については文献 [3] にも正答例としての記述がある。本報では、さらに表 4 のコメント欄にて補足説明を加えた。エネルギー質量等価式や電子質量とエネルギー単位との関係など、高校化学カリキュラムの範囲を越えたレベルでの出題であることは自明である。事前準備のために用意された準備問題集の中で、本問に関係するとみられる問題は次の通りである。

1 THEORETICAL PROBLEM 1

2 *Proton – antiproton atom*

3 Experimental and theoretical work has shown that for each of the
4 fundamental particles such as protons (p) and electrons (e) there exist
5 antiparticles which differ from their counterparts usually in one property
6 only, but have the same mass. Antielectrons (or positrons) are positively
7 charged, whereas antiprotons (\bar{p}) are negatively charged.

8 Antimatter composed of antiparticles had not been observed until very
9 recently. Antihydrogen consisting of positrons attached to antiprotons was
10 created in laboratories in 2002 (Nature **419**, 456 (2002)). An even more
11 exotic form of an atom would consist of a combination of a proton and an
12 antiproton ($p\bar{p}$).

13 1.1

14 i) Assuming that the $p\bar{p}$ atom is hydrogen-like, calculate: what is its
15 ionization energy and its Bohr radius,

- 16 ii) what is the wavelength of the transition from the ground electronic state
17 to the first excited state.

陽子-反陽子対の生成とその後の消滅については IChO 35 の前年の 2002 年に発表されたばかりであった。陽子-電子間のクーロン相互作用などによる中性原子の形成は、ボーアモデルなどに基づく原子構造として、現在では高校化学カリキュラムにも取り入れられて来た。負ミュオンの質量は同じ負電荷粒子である電子と反陽子の中間である。そして、物質中でエネルギーを失って来た負ミュオンが水素の原子核に捕獲されて、中間子原子とも呼ばれる状態となることは数十年前にはよく知られていた。2002 年に陽子と反陽子の対生成が報告された段階で、水素原子のボーアモデルの拡張が可能な粒子として、陽子-負ミュオンに加えて、陽子-反陽子が見出された訳である。

陽子-負ミュオンの系を IChO で出題し、陽子-反陽子の系についての類似の設問は IChO の準備問題として提示するというのが、当時の作題に当たっての考え方ようである。高校化学のカリキュラムで標準的なボーアモデルの適用を前提とすると、陽子-反陽子の系は直感的には陽子-負ミュオンの系に比べて理解しやすいとみられる。まず、準備段階で、それ以前から学んで来た水素原子のボーアモデルの電子の質量を陽子と等しくして陽子-反陽子系のエネルギー準位、軌道半径などを求める。そして、翌年の IChO では電子と反陽子の中間の質量を持つ負ミュオンを出題したというのが、IChO 35 であった。

ところで、IChO 35 の準備問題集にはこの他数題の放射化学関連の問題が収録されている。問 11 放射能と化学反応性、問 12 放射性炭素年代測定、問 13 ウラン の 3 問である。以下にこれらの問題を引用提示して、全体として簡単なコメント文を付記する。

1 THEORETICAL PROBLEM 11

2 *Radioactivity and chemical reactivity*

3 11.1 Give a “yes” or “no” answer to the following questions:

- 4 i) Is the γ -radiation of radioactive objects electromagnetic in nature?
- 5 ii) Do any non-radioactive exist with atomic number greater than 83?
- 6 iii) Do any radioactive isotopes exist with atomic number less than 82?
- 7 iv) Do noble gases form compounds with other elements?
- 8 v) Is Cs the most easily ionizable non-radioactive element?

天然放射能および希ガスについての基礎的な知識を問う問題である。IChO 35 ではセクション A 問題 10 にある程度は関連している（例えば小問 i）。また、その後の IChO での準備にも役立ったとみられる（例えば小問 iv は後に開催される IChO 42 での出題全般の理解をサポート）。

1 THEORETICAL PROBLEM 12

2 *Carbon dating*

3 ^{14}C is a β radioactive isotope of carbon with a half-life $t_{1/2} = 5700$ y. It
4 exists in nature because it is formed continuously in the atmosphere as a
5 product of nuclear reactions between nitrogen atoms and neutrons
6 generated by cosmic rays.

7 We assume that the rate of formation has remained constant for
8 thousands of years and is equal to the rate of decay, hence the amount of
9 ^{14}C in the atmosphere has reached steady state. As a result ^{14}C
10 accompanies the stable isotopes ^{12}C and ^{13}C in the atmosphere and
11 participates indistinguishably in all carbon chemical reactions. It forms CO_2
12 with oxygen and enters all living systems through photosynthesis under
13 constant $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio, labeling the organic molecules.

14 This fact is used for dating samples of biological origin (e. g., silk, hair,
15 etc.) which have been isolated by some way after the death of the organism
16 (e.g., in an ancient grave). The $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio in these samples does not
17 remain constant, but decreases with time because the ^{14}C present is
18 disintegrating continuously.

19 The specific radioactivity of ^{14}C in living systems is 0.277 becquerel per
20 gram of total carbon [1 Bq = 1 dps (disintegration per second)]

21 **12.1** Calculate the age of an isolated sample with a $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio which is
22 0.25 that of a contemporary sample.

23 **12.2** What happens to a ^{14}C atom when it disintegrates?

24 **12.3** What do you expect will happen to a ^{14}C containing organic molecule
25 (e.g., DNA, protein, etc.) of a living organism when this ^{14}C atom
26 disintegrates.

27 **12.4** Calculate the radioactivity of a 75 kg human body due to ^{14}C and the
28 number of ^{14}C atoms in the body, given that the amount of total carbon is
29 about 18.5 %.

ICHo 16 での出題事例の理解も含めて、 ^{14}C 年代測定法とその応用についての理
解を深める内容となっている。現時点でも良い学習教材になっているように思う。
ただし、その後は、この主題での IChO での出題はみられていない。

1 THEORETICAL PROBLEM 13

2 *Uranium*

3 Uranium (U, $Z = 92$) is a naturally occurring radioactive element which
4 occurs as a mixture of ^{238}U (99.3 %, $t_{1/2} = 4.47 \times 10^9$ y) and ^{235}U (0.7%, $t_{1/2} =$
5 7.04×10^8 y). Both radioisotopes are alpha emitters and were created at the
6 time of nucleosynthesis. Their decay is followed by a different sequence of
7 alpha ($^4\text{He}_2^+$) and beta (β^-) disintegration's, which lead through successive
8 transmutations of intermediate radioactive products to stable lead isotopes,
9 ^{206}Pb and ^{207}Pb , respectively (Pb, $Z = 82$). These sequences form two (out of
10 a total of three) so-called radioactive series. Gamma radiation, which
11 appears in various disintegrations, does not affect the transmutations.

12 ^{235}U is less stable than ^{238}U and reacts more easily with thermal neutrons
13 to undergo fission, a fact which makes ^{235}U a suitable fuel for nuclear

14 reactors. The fission reaction is as follow:

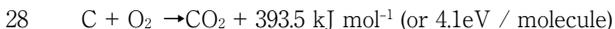


16 **13.1** Calculate the total number of alpha and beta particles emitted in
17 each of the two complete natural radioactive series ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ and ^{235}U
18 $\rightarrow ^{207}\text{Pb}$).

19 **13.2** Explain why in both radioactive series some chemical elements
20 appear more than once.

21 **13.3** Assuming that the initial isotopic abundance (i. e. at the time of
22 nucleosynthesis) was equal for the two uranium isotopes ($^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} = 1:1$),
23 calculate the age of the Earth (i.e., the time that has elapsed since
24 nucleosynthesis).

25 **13.4** Calculate the amount (in g) of carbon required to release energy
26 equal to the energy released by the complete fission with neutrons of 1g
27 ^{235}U , using to the following oxidation reaction:



ウランの同位体と放射壊変系列についての基礎的内容を分かり易く理解するための演習問題として構成されている。IChO 35 では直接関係する出題はなかったが、良い演習問題集として広く利用出来る内容である。

放射壊変系列核種については計算問題も含めて、IChO 35 以降、直接の出題例はない。IChO 33 が最後となっている。しかし、それまでの放射壊変系列核種についての出題例を集約した内容となっていることから、この分野を集中的に学ぶには良い教材である。

化学史に残る有名な研究例を IChO ではしばしば取り上げて来た。放射化学分野ではラザフォードによるアボガドロ数の決定が数回取り上げられて来たのは特徴的と言えよう (表 1)。これについても、IChO 35 の準備問題は参考となる情報を提供している。このように、IChO 35 の準備問題はそれまでの放射化学関連の出題内容を踏まえての構成をとっており、注目すべき内容である。

さて、日本初参加の IChO 35 そして日本初開催の IChO 42 は、その後の日本の

化学教育に大きな刺激となった。表5にIChO参加以前から将来の国内予選を想定して開始された高校化学グランプリ（現在の化学グランプリ ChGP）での放射化学関連問題の出題状況をまとめた。

表5 ChGPでの放射化学および同位体化学分野からの出題（太字箇所）

| 開催年 | 出題分野 | 出題テーマ |
|------|---------|---|
| 2006 | 第1問基礎化学 | 地球大気の進化、 アルゴンの発見 |
| 2008 | 第1問基礎化学 | 化学史、フロギストン説、 原子量 、ルイス酸 |
| 2013 | 第4問物理化学 | 同位体 (^3H など) 、 ^3H の増加理由、 同位体による反応機構の推定 |
| 2017 | 第1問基礎化学 | 新元素 (Nh, Og など) 、Arの発見、 ^{40}Ar の生成、Xeのフッ化物 |
| 2018 | 第3問無機化学 | 同位体 (^3H など) 、放射壊変、壊変様式、 ^{14}C 法、K-Ar法、 崩壊エネルギーの発生と利用 |
| 2018 | 第4問有機化学 | 有機物の質量スペクトル、 同位体効果 |

このように、2003年のIChO参加は放射化学関連の設問が出題されていなかったChGPにも大きな変化をもたらした。まず、同位体化学関連のテーマが2006年、2008年と出題された。その後、福島原子力発電所過酷事故を経た2013年には放射化学ベースの1問が出題されるに至る。その後も、2017年、2018年にも放射化学に関するテーマでの出題が続くのである。これには、ニホニウムNhの発見が化学の世界だけではなく化学とその応用への社会的関心をも引き起こしたことが影響しているとみられる。

また、表5には現れてはいない2016年、2019年、2021年には問題の選択肢の中に放射化学関連の項目が散見される。大きなテーマとして扱われていない場合も、問題を構成する要素として、放射化学関連の出題はほぼ継続的な状況となっている。

なお、現行の高等学校化学（化学基礎を含む）の教科書の「元素の周期表」にはオガネソンOgに至る超アクチノイド元素が全て登場している。原子番号83のBi以上の元素は、安定同位体が存在しないので、全て放射性元素である。放射化学関連のテーマは化学教育の基盤に取り込まれていると言えよう。

4. まとめ

以上のように、日本の IChO への参加やその開催は、先導的かつ国際的な化学教育カリキュラムの導入を国内の教育活動にももたらして来た。前報 [2] と本報告で IChO がどのような影響を国内の化学教育に与えるのかが、ある程度明らかになって来たので、国内大会の性格を持つ ChGP や他の類似の活動との関係などに注目した研究をさらに展開したい。

文献

- [1] 薬袋佳孝、「国際化学オリンピック」、創造性の育成塾 (2017)
- [2] 薬袋佳孝、武蔵大学リベラルアーツ&サイエンス学会雑誌、第 1 号、p.33-47 (2024)
- [3] International Information Centre of the International Chemistry Olympiads (IChO IIC), <https://www.icho.sk/> (2023)