

平成 24 年 7 月

平成 23 年度 研究業績レビュー(中間レビュー)の実施について
(和文仮訳)

基礎基盤研究推進部
加速器推進課

基幹研究所、仁科加速器研究センター及び放射光科学総合研究センター研究業績レビュー規程(平成 15 年規程第 75 号)に基づき、下記のとおり研究業績レビュー(中間レビュー)を実施いたしましたので、報告いたします。

1. 森田超重元素研究室(森田浩介准主任研究員)

1) 評価体制

実施日:平成 24 年 2 月 29 日(水)

4 名の所外有識者を評価委員とするヒアリングレビューを実施。

評価者【アルファベット順】

萩野浩一

東北大学大学院理学研究科

Sigurd HOFMANN

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

宮武宇也

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所

中原弘道

東京都立大学名誉教授

2) 評価結果の概要等(下記評価者順は評価者一覧の順とは異なる)

全体意見:

【評価委員 A】

超重元素研究室は、113 番元素の原子核の合成に成功した後に設立されたが、それは、森田浩介准主任研究員と共同研究者のグループのかけがえのない、たゆまぬ努力の賜物であった。このグループの歴史は長いですが、私は、現在のグループ員が、世界中のこの研究分野において科学的研究活動を推進する上で指導的役割を果たしていると信じるものである。

研究目的

超重元素の研究領域により、原子核物理及び原子核化学における基礎科学の新しい部門が開かれた。これらの元素を探求すること、特に研究室で新元素を発見することは、社会の夢の一つと考えられよう。原子核物理学の観点からは、これらの元素により、多核子系の原子核安定性の機構に関する情報のみならず、衝突する重イオンの反応に関わる核子の反応ダイナミクスに関する情報が得られる。原子核化学の観点からは、我々は、これらの元素の新しい化学的性質が発見されることを期待している。それは、周期表の同族体とは異なることが考えられる。

本研究室は、新元素の発見により、科学研究を拡大し、社会にインパクトを与える上で重要な役割を負っている。研究テーマは以下のように分類されている：(1) 新超重元素の探索，(2) 超重核の分光学的研究，(3) 超重元素の化学的性質の研究，及び，(4) 核融合過程の反応機構の研究。

研究成果

まず第 1 に、高い収集効率を有する GARIS と RILAC(理研重イオン線形加速器)からの強い重イオンビームとのユニークな組み合わせにより、SHE(超重元素)の発見につながる希少反応事象の研究が可能になったことに注目すべきである。特に、この種の研究には長期間の実験が不可欠である。これは、仁科加速器研究センターの研究戦略により実現されている。

5 年間の研究期間のあいだ、森田准主任研究員に率いられた研究室では、GARIS 施設を最大限利用して、多くの貴重な科学的成果が生み出されてきた。特に、ガス-ジェット輸送システム及び GARIS II を建設することにより、SHE 領域での原子核化学を探求することに成功した(研究テーマ(3))。

研究テーマ(1)では、113 番元素を確証するために、長期の実験に奮闘してきた。実験を通して、これまでの実験で観測された 113 番元素からの崩壊スキームが、 ^{266}Bh の崩壊の測定を通して確認された。いくつかの理論的研究が、SHE 合成の機構についてなされてきた(研究テーマ(4))。さらに、研究テーマ(2)において、 ^{277}Cn の生成断面積の確認に成功するとともに、重同位元素 $^{263}\text{-}^{265}\text{Hs}$ の崩壊分光の確認にも成功した。

これらの研究テーマについて、グループのメンバーにより多くの研修生が指導され、教育されてきたことは注目に値する。

研究室の運営

上記の研究テーマを実施するために、研究者及び技術者を含む限られた人的資源の中で研究室はよく組織化されている；その中の幾人かは、数ヶ月に及ぶ長期のマシントimeで大きな貢献した。これらの研究テーマは国内外の研究者との共同研究のもとで十分発展させられているが、グループのメンバーは、多くの開発業務、実験準備及びメンテナンスのために、互いの議論や相互交流の時間がほとんど持てないように見える。原子核物理の研究スタッフを増員すれば、科学的研究活動を効果的に前進させることができ、その結果研究者の相互交流のための時間が十分に取れるようになるだろう。

将来の研究計画

未知元素の領域へ研究の拡張、及び MR-TOF 装置を用いた質量の直接測定への挑戦は、妥当な将来計画である。なぜなら、GARIS 施設の性能は、世界中の競合する研究室の中で、これらの研究テーマでリーダーシップをとりうる潜在的可能性を持っているからである。重元素の領域において実験と理論のあいだのたゆまぬ相互交流が強く望まれる。

GARIS と AVF 施設の実験装置を十分に使いこなすことによって、重元素についての化学の研究計画を進めれば、SHE 領域のフロンティアを開拓することができるであろう。これはまた、この分野の研究者及び学生にとって、又とないよい機会が与

えられることになる。SHE についての核化学の中心となる研究室の一つとして、国内研究グループとのより強固な共同研究が奨励される。

全体評価

極めて良い研究環境のおかげで、このグループは、最初の 5 年間という期間で、科学的研究を進め、そして研究の可能性を大きくすることに成功した。このことにより、限られた人的資源にも関わらず、このグループの科学的能力が十分に実証された。新しく建設された実験装置、すなわち、核化学のためのガス-ジェット輸送システム及び高温融合反応からの残留核の効率的収集に特化した GARIS II が将来の研究計画において重要な役割を果たすであろう。

【評価委員 B】

超重元素研究室に於いて 2012 年 2 月 29 日に、丸 1 日かけてされた研究評価はよく組織されていた。必要な文書は全て、前もってあるいは当日評価者に渡された。

この重要な研究テーマについて評価者として招聘されたことは大変名誉なことであり、延興センター長、ヘニング副センター長及び森田准主任研究員に、会議中の温かいもてなしと寛大で科学的な雰囲気を持っていたことに感謝したい。また、実りある有益な意見交換をさせていただいた共同評価委員にも感謝したい。

森田准主任研究員により、理研における最近実施された研究活動及び将来計画について詳細に紹介された。それぞれ異なる部署に責任を負っているグループメンバーの 4 人についても面談した。

超重元素研究室の研究目的は、超重核の合成、同定及び安定性の研究並びに超重元素の化学的性質の研究に焦点が当てられている。何十年にもわたって、この研究テーマは世界中の主要な研究室において興味を中心である。新発見は、科学論文誌において、最もセンセーショナルな報告に属するが、それはまた、日刊新聞、ラジオ及びテレビにおける話題となるニュースでもある。この意味で、研究プログラムの目的は、新元素の命名でもって最高潮に達するであろうが、研究所全体ひいては国全体の大きな出来事になるであろう。

物理的、化学的実験のために森田グループで使用された主たる研究装置は、ガス充填分離器GARISと、関連する精巧なターゲットと検出装置である。この装置は、世界中で最も強力な分離器に属する。2000 年にGARISをRILAC施設に移設した後、一連の重要な実験が開始された。コペルニシウムcopernicium (Z=112)元素の合成に至るまでの冷温核融合に関する既知のデータが再確認され、機器の優れた性能が実証された。これらの前向きの成果に勇気付けられ、グループは、冷温核融合反応 $^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi}$ で 113 番新元素を探求する実験を開始した。2004 年 7 月及び 2005 年 4 月に、2 つの新しい崩壊系列が測定された。崩壊系列は新同位元素 $^{278}113$ に対応付けられた。

崩壊系列の正確な対応付けは、 $^{23}\text{Na} + ^{248}\text{Cm}$ の高温核融合反応を利用した $^{278}113$ のひ孫娘核である ^{266}Bh の研究において確認された。 ^{266}Bh の 24 の崩壊系列の観測で測定された崩壊データは、 $^{278}113$ の崩壊系列で測定されたデータと一致した。これらのデータは、現在、113 番元素発見の優先権に関してIUPACにより評価される準備がなされている。

追加の実験の内容は、新しい原子核の合成と崩壊の分光学に関連するものである。これらの研究は、断面積が大きくかつより短い測定時間という条件でなしえるものであり、それゆえ、若い人々の科学的教育にとってきわめて貴重なものである。同じ議論が化学実験について当てはまって、大きな科学的意義のある研究テーマについて若い化学者に学位論文を書く機会を与えるであろう。これらの実験は、小さい断面積を持つ反応を使ってはできない技術的改善の試験をするためにも必要である。

いくつかの技術開発がなされた。なかでも新しい分離器 **GARIS- II** の建設は最も複雑なものである。効率的なガス輸送系の開発と共に、この分離器の高い効率により、同位体及び元素の物理的及び化学的性質の研究への道が開かれた。他の方法ではできないものである。

なされたアップグレードは、将来計画における実験の実施のために必要な前提条件である。 ^{76}Ge ビームを使用した冷温核融合及び ^{248}Cm ターゲットを使用した高温核融合の継続は、確かに最も重要かつ最も挑戦的な研究である。特に、 ^{248}Cm ターゲットを用いる実験は、新しい 119 番及び 120 番元素合成への可能性を開く。

森田グループにより得られた実験データは、**SHE**の安定性及び合成に関して、世界中の様々な研究所の理論家にとって大変興味深いものである。この点を明白に述べた論文が、 $^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi}$ の冷温核融合反応の種々の脱励起チャンネルに関して **T. Ichikawa and A. Iwamoto**により発表されている。

紹介された研究成果、議論及び研究室見学から、研究プログラムはよく考え抜かれているという印象を持った。それは現在の技術的可能性と利用可能な人的資源とに調和している。他の研究所と比較して大きな優位性は、断面積の小さい測定に長いビーム時間を確保できることにある。**Dubna** の **JINR** を除いて、この状況は世界的にユニークである。

119 番及び 120 番元素は、おそらく現在の実験技術で生み出される最後の元素である。これには格別の努力が必要である。全ての前提条件、長寿命の ^{248}Cm ターゲット、 ^{54}Cr ビーム、まだ利用できない ^{51}V ビームを除き、それと十分長いビーム時間が理研と超重元素研究室に揃っている。それゆえ、この野心的な目的を高い優先度で追求することを提案する。森田准主任研究員の将来計画に表明されていたように、他の研究所との密接な共同研究が、間違いなく有益であろう。

【評価委員 C】

新元素を合成し、同定することの最も重要な動機のひとつは、重原子核の構造の理解を深めることであり、ゆくゆくは $Z = 120$ 付近の閉核構造を予測することである。これらの研究は、重イオン核融合反応の 2 つの異なる型、すなわち、いわゆる冷温核融合と高温核融合反応、を用いて実施されている。森田准主任研究員と彼のチームは、森田と彼の共同研究者達による 113 番元素の発見成功の後、彼の強いリーダーシップの下で、冷温核融合反応を利用して、この研究に多大の努力を注いできた。過去 8 年間にわたるたゆまぬ努力にもかかわらず、3 例目の事象はいまだ観測されていないことは残念ではあるが、彼らは世界的に認知されており、国際シンポジウムで多くの招待講演に呼ばれている。森田は、いまやこの分野での世界的リーダーである。加えて、森田と彼のチームは、研究の興味を超重元素(**SHE**)の化学研究へと拡大している。実際、化学プログラムは研究室の主要将来計画の一つであり、理研

外の多くの大学や研究所、例えば新潟大学、大阪大学、JAEA、金沢大学及びオスロ大学、との共同研究でもってさらに探求されることになる。

世界中の多くの研究室が、高温核融合反応による SHE 研究に軸足を移している中で、理研は、SHE の探索を冷温核融合反応で行っているユニークな施設である。冷温核融合反応は、高温核融合反応と比較して、元素のより明瞭な同定ができる。森田グループが研究活動を続けてこの分野に寄与するために、研究所の支援が継続してなされることが重要である。

研究目的

超重元素の物理学が、低エネルギー原子核物理学において最も重要な研究分野の 1 つであることに、異論はない。新元素の同定は、原子核の多体問題の理解に光明を投ずるものであろう。

研究成果

Z=113 元素の合成において 3 番目のイベントを観察したことは、科学的に重要なことであり、大きな社会的インパクトを与えるであろう。

研究室の運営

森田は良い物理学者であるけれども、研究室の研究成果は、研究スタッフとくに定年制研究員の貢献がなければ得られなかったであろう。グループの研究スタッフへのインタビューでは、彼らの多くがグループの研究の雰囲気満足していると述べた。同時にまた、彼らは、マンパワーが足りないと感じているとも述べた。羽場が理研の他のグループに異動した後では、可能ならば核化学の分野での人員の追加が望ましい。

将来計画：関連分野との協力の可能性、他

これまで、森田グループは研究の大部分を新元素の合成に焦点を絞ってきた。2006 年に研究室が設立されて以来 5 年間は、この戦略は受け入れられるものである。しかし、私は、核融合断面積のシステムとエネルギー依存性、分光学及びアルファ崩壊と核分裂の力学を含む重イオン核融合反応の反応力学のような、超重元素のより物理的な観点に視点を広げるよう彼らに奨励したい。例えば、SHE に関連する反応の後方角における飛翔体状粒子のエネルギー分布の測定により、原子核がどのように衝突するのか、核子が一つの原子核から他の原子核へどのように転移するのか、また、入射エネルギーが内部エネルギーにどのように散逸していくのか、という貴重な情報が得られるであろう。アルファ崩壊と核分裂の多体の観点もまた、重要なトピックであり、未だ完全には理解されていない。

全体評価

過去 5 年間における森田グループの成果は、高く評価できる。彼らの研究は強く奨励されるべきである。

その他の意見

評価委員の中に議長を置かないことは良い制度であると思う。とりわけ委員が少ないので。一方で、我々が研究スタッフとのインタビューをどのように進めるべきかより

詳細な指示があればより良いものであったろう。実際、すくなくともインタビュー・セッションにおいては議長が置かれていれば良かった。我々は、どのように開始すべきか何を聞くべきか最初は少し混乱した。次第に慣れていったのであるが。

【評価委員 D】

研究目的

新元素 Z=113 の新規合成は、ロシアの Dubna でのみ試みられてきた。この意味で、このグループの試みは、現時点でかなり新しく、その試みは、彼らの方法で合成に成功する限りにおいて、高く評価されるべきものである。

日本の科学の歴史の中で、新元素発見の試みはわずかに 2 例記録されているのみである。1 つは、東北大学の小川教授の報告で、彼がイギリスの W. Ramsay 教授のもとに滞在していた 1904 年に、thorianite 鉱石の化学分析により Z=43 の新元素を発見したと主張して、“ニッポニウム”と命名した。最近、それは Z=43 ではなく Z=77 のレニウムであることが判明した。その当時は本当に未発見の元素であった。第 2 は、1940 年頃に、仁科博士のグループが木村教授とともに理研で行われた、Z=93 のネプツニウム発見の試みであった。彼らは、ベータ崩壊して新元素と主張する Z=93 になる新核種 U-237 を発見した。しかし、彼らは、ミルキング法による化学技術により新元素の同位体 93-237 核種を分離して同定することができなかった。

科学的意義：新 SHE の製造に関する報告は、Z=116 までの偶数 Z、例えば 112、114 及び 116、についてのみ、IUPAP 及び IUPAC の合同作業部会 (JWP) により承認された。奇数 Z 元素の合成は、偶数番に比べより難しい。おまけに、原子核の安定性及び詳細な原子核構造の理解は、より重い SHE の研究のために本質的に重要である。

研究成果, 独創性, 科学的意義

研究トピックは多方面にわたっている。以下のものを中心としている。

1) Z=113 の新元素の合成、及び、2) Bh-266, Db-262, Hs-263, Hs-264、並びに Rf (ラザホージウム) 及び Sg (シーボーギウム) 同位体のような種々の同位元素の原子核分光、3) 重アクチニド No (Z-102) を含む重元素の化学的性質の研究。ノーベリウム の酸化還元ポテンシャルを世界で初めて測定したことは、大いに評価されるべきである。また、Sg のイオン交換特性に関する彼らの成果は、多数の事象 (原子) の良い統計に基づいており、アメリカ (米国) 化学会誌のような普通の化学論文誌に初めて発表された (それまで、SHE に関する化学論文は、たいていがより専門的な論文誌、例えば *Radiochimica Acta*、に発表された)。

新しい実験施設・装置の開発への彼らの努力もまた、評価されるべきものである。例えば、(1) GARIS II、(2) フラッシュ ADC を利用したデータ収集システム (森本)、GARIS と結合したガス-ジェット輸送システム (加治及び羽場)。これらの施設の開発は、希少な反応性生物を高い効率で輸送し、非常に低いバックグラウンドの観測条件を作り出すために、また、SHE 核種の崩壊の高速観測を実施するために (原子核分光)、本質的に重要である。

研究室の運営;

公表された彼らの数多くの仕事から、小人数で多方面の質の高い実験結果を産み出すために過重労働しているであろうと推測していたにも係らず、各研究室員が皆現状の研究状態に満足していることは、私には驚きであった。彼らは皆有能で仕事熱心な研究者に違いない。リーダーや労働環境について不満を述べたものはいなかった。

日本では東海村の JAERI で SHE 化学の研究が開始され、彼らが組織して今年日本で SHE 化学のワークショップが開かれる予定であるけれども、理研はいまや、日本だけでなく世界中での「超重元素科学のセンター」である。次回の TAN(超アクチニウム原子核)シンポジウムが、日本で開催される予定である。今年ロシアのソチで開催されて、次回は日本で開くことが決定された。

将来計画： 関連分野との協力の可能性, 他

大学、特に大阪大学及び名古屋大学の核化学グループと、効果的な共同研究を行っている。それゆえ、本グループの活動は、若い大学院生により効果的に支援されており、代わりに、理研は次世代の若手研究者に貴重な教育機会を提供している。

理研の研究者の定員は限られているので、理研、すばらしい加速器及び新しい超重元素科学を研究する科学者の能力の優位性を保つためには、SHE グループの要員の観点からの検討が必要であろう。

全体評価

グループは、科学的生産性及びグループ内の人間関係の観点から、大変良く運営されている。しかし、 $Z=113$ の合成という現在の主プロジェクトを再検討することが推奨される。また、グループの構成、すなわち、グループの研究員数について検討されるべきである。

以上