

# 理研仁科センター 諮問委員会報告書

(仮訳)



2016年9月13日提出

報告書：仁科センター諮問委員会(NCAC)の所見と提言

目次：

前書き

I. 緒言 .....	1
II. 組織, 運営, 人員及び予算 .....	1
III. RIBFの科学ハイライト .....	2
IV. 理論 .....	4
V. 仁科センターにおけるハドロン物理学 .....	5
VI. 加速器及び応用 .....	6
VII. 理研 BNL .....	7
VIII. 理研 RAL .....	8
IX. 分野横断的研究 .....	9
X. 研究戦略及び将来計画 .....	9
XI. NCAC2014 提言に対する対応 .....	12
XII. NCAC から松本理事長への提言 .....	14
XIII. 付録 (議事次第, メンバーリスト) 省略	

## 前書き:113 番元素

・2015 年の大晦日, IUPAC/IUPAP 合同作業部会(JWP)は, 理研森田グループによる 113 番元素の発見を認定した。

・森田グループは, 新元素の名称として「ニホニウム」, 記号として「Nh」を IUPAC の無機化学部門に提案した。

・慎重な審議の結果, 無機化学部門は IUPAC としてこれらの提案を採用するよう提言し, 名称と記号に関する 5 か月間の公開レビューを 2016 年 6 月 8 日に開始した。

仁科センター諮問委員会(NCAC)は, この記念すべき業績に対して, 森田と彼のチームに, また仁科センターの幹部, 研究者及び全職員に, 大いなる祝意を表すものである。

### 前書き

NCAC は, 仁科センターで展開された「エキゾチック原子核」に関する研究の成果により, 2015 年仁科記念賞が本林と櫻井の「魔法数の異常性」の研究に対して授与されたことを喜んで強調したい。これは二人が原子核物理学のこの分野で傑出した先導者として認められたことを示すものでもある。

最後に, といっても他に劣らず重要であるが, NCAC は上垣外の下で加速器チームが達成した加速器技術における鍵となる開発に強い感銘を受けた。新しい「グラフェン」炭素膜の使用により RIBF 施設が  $^{238}\text{U}$  ビームで 50 pnA の強度という前人未到の世界記録を作った。この偉業により RIBF が世界の希少同位体研究において第一級の施設であるという現在の地位が固められた。

## I. 緒言

NCAC は, 松本理事長, 松本理事, 小安理事, 延與センター長及び理研仁科センター(RNC)のすべての職員に, その手厚いもてなしに対して感謝したい。NCAC はまた, 仁科センターが国内外で実施した研究活動の全貌を紹介するためになされた努力, 中期計画運営方針及び将来の研究戦略の概要を紹介するためになされた努力を高く評価する。NCAC は, この会議に向けて素晴らしい準備をした仁科センターの準備委員会に謝意を表したい。特に参考文書(supporting documents)の質の高さ及び口頭発表の明晰さは, 本 NCAC でのレビューを進めるうえで大いなる助けとなった。

NCAC は, レビューの「諮問事項」に詳細に示されている内容から, 本レビューが, 理研の全役員が交代したという特別な時期に当たったことを承知している。

NCAC は, 松本理事長により与えられた諮問事項を指針として, 仁科センターの組織, 資源, 人員の運用と育成, 研究プログラム, 現在進行中のプロジェクト及び今後10年間の研究戦略についてレビューを行った。

## II. 組織, 運営, 人員及び予算

### 所見:

NCAC は, 現在の運営組織体制がよく機能しており, それによって仁科センターにおける科学研究が効果的に促進されていると判定する。ここでの科学研究には時として世代を超えて展開さ

れる長期的努力が要求されるものである。NCAC はまた、実験課題採択委員会制度がよく機能しており、外部委員による審議を通して研究プロジェクトの高い質が維持されていると判定する。

NCAC は、仁科センターの現在の運営体制と組織が科学研究の卓越性を成功裏に助長させていると判定する。このことの証左として、超重元素とRIBFプログラム、RHIC スピン物理プログラム、RAL の MuSR プログラム、理論研究、並びに ImPACT プログラムのような応用研究の成功があげられる。

NCAC は、仁科センターが、唯一無二の加速器施設及び最新鋭の粒子検出技術に基づき、科学技術イノベーションのための世界規模のハブとして認められていると判定する。

NCAC は、仁科センターにおける最先端の科学研究と独特な施設が海外の多くの研究者及び共同研究者を惹きつけており、その結果海外からのユーザーの割合が高くなっていることを見出した。また、BNL 及び RAL という理研の独特な海外支所の存在が仁科センター内の知的交流を促進している。

NCAC は、仁科センターの研究者がその分野での指導的研究者として認められていることを理解した。これには、櫻井及び本林に仁科記念賞が授与されたこと、また秋葉が PHENIX の実験代表者に指名されたこと、さらには仁科センターの他の研究者も様々な分野で認知されていることが証拠となる。

提言：

NCAC は、現在の世界第一級の研究プログラムの継続性を保証するため、仁科センターの特別な組織構造の強みを保持する方法で人事制度改革を実施することを強く理研に要請する。

NCAC は、世界第一級の独特な RIBF 施設における新発見の可能性と能力を完全に発揮させるべく、8 か月運転が必要であると再度繰り返しておく。こうすることにより研究基盤施設への相当な投資に対する見返りが最適なものとなり、世界を先導する地位を保持できる。

NCAC は、科学研究の成果を最大化するために、仁科センター内のサブグループ間、例えば理論と実験グループ間や国内外の他機関のグループと、より緊密に連携することを奨励する。

### III. RIBF の科学ハイライト

#### 所見 1：施設全般

RIBF は次の三つの要因が組み合わさった世界第一級の施設である。(a) 最もエキゾチックな原子核を世界一の強度で生成する加速器施設の能力、(b) 最先端の実験装置を利用できること、(c) 研究分野のまさにフロンティアで活躍している国内外の科学者からなる一流チームの献身的な貢献。

#### 所見 2：重元素研究

113 番元素 (Nh) の命名権獲得で実証されたように、この研究プログラムは世界第一級であり、超重元素の科学の普遍的理解にむけ大きく貢献している。研究グループは GARIS 分離器で成功をおさめ、現在 GARIS-II 分離器を稼働させている。これらの機器は、この分野を引続き牽引するために必須の装置となる。

「熱い核融合」法を使用した実験が Lv(リバモリウム:Z=116) の生成をめざして行われた。先行研究で報告されていた断面積の大きさと既知の崩壊系列が確認されたのみならず、さらに新たな

崩壊系列も発見された。

GARISを用いた化学的性質の研究により、Sg(シーボーギウム:  $Z=106$ )が周期表の第6族に分類されることが確認された。その後、研究チームは  $Z=107, 108, 109$  及び  $112$  を持つ元素の化学的性質の研究に発展させつつある。これらの元素の化学的性質における相対論的効果の役割が正しく評価されるであろう。

GARIS-II は 116 番元素の生成成功など、成功裏に運用開始された。研究グループは現在、 $^{248}\text{Cm}$  標的と大強度の Ti 及び V ビームを用いた 118 及び 119 番元素、 $^{248}\text{Cm}$  標的と Cr ビームを用いた 120 番元素、さらに  $^{249}\text{Cf}$  標的と Ti ビームを用いた 120 番元素の探索研究の準備を精力的に行っている。これらの実験が成功すると、この研究プログラムは超重元素研究の最前線に立ち続けることになる。

### 所見 3 : 原子核構造及び天体核物理研究

既存の装置類は過去 2,3 年のうちに使いこなされ、科学研究の推進に最適な状況になっている。例を挙げるならば:

- SAMURAI を用いた実験により、エキゾチック原子核の反応を、運動学的に完全に測定する研究、特に弱く束縛された系の研究が可能となった。液体水素標的 MINOS, ガンマ線検出器 DALI2 及び FAIR/GSI から送付された中性子検出器 NEULAND と組み合わせることで、SAMURAI の優れた能力が実証されている。
- EURICA を用いた一連の実験によって、核図表の広範囲にわたる崩壊分光研究プログラムが完了し、著しい成果が続々と発表されている。
- SEASTAR 国際共同研究により、MINOS 液体水素標的と DALI2 ガンマ線検出器をゼロ度スペクトロメータと組み合わせた測定系が、非常にエキゾチックな原子核の第一励起状態を研究する強力な道具であることが実証された。

中性子 4 体の系が低エネルギーの共鳴状態を持つという非常に興味深い実験結果が報告された。最近完了したより高統計の実験によって、この好奇心をかき立てる結果が厳密に検証されると期待する。

$^{26}\text{O}$  の高精度分光実験によって、基底状態が非束縛の閾値共鳴であることが明確に確認されたばかりでなく、第一励起状態である  $2^+$  準位のエネルギーも決定された。

$^{32}\text{Mg}$  の中性子過剰側にある「反転の島」に属する非常に弱く束縛された原子核、奇偶核  $^{37}\text{Mg}$  と  $^{39}\text{Mg}$ , 並びに偶偶核  $^{40}\text{Mg}$  の構造が初の分光測定により調べられた。これらの系は弱く束縛されているだけでなく、大きく変形していることが分かった。変形した量子系の測定例としてはおそらく最良のものである。

$^{78}\text{Ni}$  の励起状態が初めて測定された。これにより、この原子核が 2 重魔法数を持つことが実証されただけでなく、この特性を記述すべき理論研究にとって挑戦的な課題となる。

中性子過剰な Se(セレン)の同位体で中性子数が 52 から 60 へと変化するに伴い、原子核の形状がパンケーキ型—葉巻型—パンケーキ型のように変わることを示す初めての実験的証拠が得られた。

2 重魔法数核  $^{132}\text{Sn}$ (スズ)の中性子過剰側の領域にある原子核の殻構造の描像が、 $^{136}\text{Sn}$  や  $^{138}\text{Sn}$  の様々な励起状態の測定から明らかになりつつある。

$Z=37\sim 50$  領域における 110 種類の同位体についての寿命データ、さらに  $Z=51\sim 62$  領域における 97 種類の同位体の寿命データが一連の実験により得られた。これらのうち、約 100 種類の中性

子過剰核の半減期の測定は世界初であった。これらのデータは r 過程における原子核合成ネットワーク計算のために決定的に重要な入力である。

#### 所見 4 : 将来に向けた特筆すべき実験機器の開発

RIBF で現在進行中の多くの開発の中で, NCAC は, 将来の科学の進展への寄与が大い期待される以下の事例を特筆したい。

- 最近開始された希少 RI リングでの質量測定は, 不安定原子核の殻構造の進化に関わる重要な研究を可能とし, 天体物理学で予言されている r 過程の解明につながる。
- 中国及び韓国との共同研究で進んでいるアジア地域共同ガンマ線飛跡アレイの開発は RIBF において世界第一級の高分解能ガンマ線分光実験を実施するために必須な測定器であり, 望ましい実験施設の強化となる。
- BigRIPS 施設に接続されているガスストッパーから RI ビームを抽出する SLOWRI 施設は, MR-TOF 装置を用いた質量分析と, エキゾチック原子核のモーメント測定のための原子ビーム共鳴分光を可能とする, 世界をリードできるプログラムである。
- 多数のヘリウム-3 計数管からなる BRIKEN 中性子計数管アレイが国際コラボレーションにより理研に持ち込まれた。この実験装置により r 過程において重要な  $\beta$  遅延中性子分岐比を測定する研究プログラムが実施可能になる。

## IV. 理論

所見 :

仁科センターの理論研究部門は, 初田をリーダーとして, 国内外で最高レベルの知名度を持っている。現在の主要研究目標である「QCD から宇宙へ」及び「新しい理論フロンティアの探求」は, 初田と肥山の研究に立脚して進められている。2名の准主任研究員, 中務と橋本は, 2014 年に開催された前回の NCAC レビュー以後に理論研究部門を離れ, それぞれ筑波大学と大阪大学の教授となった。中務の専門分野は原子核の密度汎函数理論であり, 橋本の研究はゲージ/重力対応に基づく弦理論である。

初田のグループは, 格子ゲージ理論において最先端の研究を行っており, グループは, 現実的なクォーク質量と大きな格子体積を系統的に取り扱い, ストレンジネスを含むバリオン-バリオン相互作用の草分け的計算を行っている。量子場理論におけるこれらの研究活動及び関連プロジェクトにより, 低温及び高温の QCD 物質, 原子核の状態方程式, 中性子星の物理などに関わる実験プログラムに対してユニークな理論的予言の道を切り開いている。肥山は少数多体系に対する厳密計算の専門家であり, 少数中性子系, 軽いハイパー核, ユニタリ極限におけるフェルミ気体の研究で極めて知名度の高い研究を行っており, またフェルミオン多体系の系統的研究も追及している。

理論研究部門は素晴らしい研究成果を上げている世界最強のグループの一つである。理論核物理における最先端の研究を通して, 多数の若手科学者(ポスドク及び博士課程の学生)に優れたキャリア機会を提供している。理論グループは国内外における理論及び実験の主導的グループとの共同研究も行っている。NCAC は, 初田のリーダーシップのもとでの, 理論科学連携研究推進グループ (iTHES) の強力な学際的取組にも感銘を受けた。このプロジェクトでは, 物理学, 生物学, 化学及び計算科学の分野連携が行われている。理論グループは, 理研の神戸センターにある強力な計算施設(京コンピューター)を利用して, HPCI(高性能計算インフラストラクチャー)プログラムとも密接な関係を築いている。また, 理論グループは, 解析的理論, 先端的アルゴリズム

及び高性能計算施設など広範囲の研究ツールを有している。

仁科センターにおける理論グループのユニークな研究を評価する一方、NCAC は理論グループの将来について極めて憂慮している。先に述べたように、中務と橋本が最近グループを離れた。加えて初田が 2018 年に仁科センターを退職する予定である。これらの帰結として、仁科センターにおけるこれまでの理論全体の取組が無に帰するリスクがある。仁科センターにおける幅広くかつ国際的に大きな競争力を有する原子核理論プログラムの将来を保証し、とりわけ現代的な原子核構造論の分野を強化するために、時宜を得た対策を講じる必要がある。そのような取組は、RIBF の実験プログラムのみならず、世界の低エネルギー原子核実験及び原子核理論に資するであろう。

提言：

幅広く国際的競争力の高い現行の原子核理論プログラムの将来を保証するため、初田主任研究員の後任ポストは可能な限り早く埋められるべきである。これまでの NCAC 提言を再確認し、本 NCAC は仁科センター内外での不安定核ビーム物理のプログラムに対する支援と科学的指針の提供のために、現代的な原子核構造の理論分野において終身雇用のポストを作るよう求める。

## V. 仁科センターにおけるハドロン物理学

所見：

仁科センターでは RIBF, BNL-RHIC, GSI 及び J-PARC などの研究機関における実験を中心に、ハドロン物理を推進している。特に、中間子がクーロン力で束縛された原子状態や中間子が原子核中に存在する状態の研究に主眼を置いた展開がなされている。最近の顕著な業績の一つは、RIBF においてなされた Sn 同位体の中性子数の変化に伴う  $\pi$  中間子原子準位の変化を高分解能で測定した実験である。この新しいデータにより核物質中のカイラル対称性の破れについての正確な情報が生み出される。また、GSI での  $\eta'$  原子核の最初の予備的な測定データも示された。

J-PARC では、仁科センターのグループが中心となりいくつかのハドロン物理実験が進められている。その中で、K 中間子原子に関する最近データでは、K $\pi\pi$  束縛状態の可能性の高い構造の存在が示された。もしもこのデータが示した状態が確定されたならば、これは K 中間子原子核研究に関する重要な新しい結果を示すものである。新規 X 線検出器 (TES) の研究開発を含む K 中間子原子 X 線測定実験及び原子核内  $\phi$  中間子の質量シフトの測定実験についての研究開発と実験準備が進行中である。

提言：

NCAC は、仁科センターのハドロン物理グループはこれまでの成果に基づき、J-PARC での将来の研究活動を通してその分野における指導的地位を維持するために奮闘するよう提言する。

## VI. 加速器及び応用

### VI.1 加速器

所見：

仁科センターは、 $H_2^+$  から U にわたる多種のイオンビームについて RIBF 加速器施設の性能を最大限に引き上げることに驚くほど成功してきた。ビーム荷電変換技術のみならずビームパワーやビーム性能の改善は素晴らしいもので、たとえば  $^{48}Ca$  のビーム量では約 700 pnA,  $^{238}U$  では 50 pnA を達成している。ビームの可用性(信頼度)は特筆すべき約 90%に達している。

また RIBF 加速器施設は、超重元素研究のため GARIS 測定装置に信頼性の高い独立したビーム供給を行うことができる。放射性同位元素(RI)製造には独立運転が可能な AVF サイクロトロンが使用されている。RILAC (3MeV/u) 及びそのブースター(2MeV/u)の運転が、元素記号 Nh をつけられた Z=113 超重元素の発見に不可欠のものであったことは着目すべきである。

NCAC は、超電導リングサイクロトロン(SRC)を含む世界を先導する加速器施設において目を見張るような進歩と性能向上が達成されたことを重要視する。

NCAC は、老朽化した部品の交換計画の緊急性を認識している。さらに、現在進められている素晴らしい活動を維持する上で、利用可能な人的資源の規模が最低限のレベルであることを指摘したい。この状況は改善される必要がある。

提言：

NCAC は仁科センターの加速器施設の傑出した性能を認めるものであり、加速効率のさらなる改善を可能とするために、十分な専門知識と研究資源が維持されるべきであると提言する。このことは研究プログラムの長期的な将来にとって鍵となる。

### VI.2 応用研究

#### VI.2.1 イオンビーム育種

所見：

仁科センターの重イオンビーム育種は、以前にもまして知名度と生産性がとても高い応用研究である。SIP プログラム「次世代農林水産業技術」の一員として、これらの活動は実際に、健康、食糧、環境及びバイオ燃料に関連した社会的問題の解決を目指す重要な技術開発に貢献している。

突然変異率の LET(線形エネルギー付与)への依存性が研究された。最良の突然変異率を与える LET 値が確かに存在し、それが研究対象の種に依存することが示されている。また、変異遺伝子の欠損サイズと LET との関係も研究された。これらの研究は、ユーザーの要求に合わせた照射処理を計画するために有用である。

重イオン育種チームの上げている優れた成果は、阿部のリーダーシップによるところが大きい。この分野での研究の活力と質を維持するため、後継者の育成を注意深く検討することが非常に重要である。

提言：

NCAC は、イオンビーム育種プログラムの重要性を認めており、この技術のさらなる応用展開に



向けて、イオンビーム育種の利点を最大化する努力を行うことを強く提言する。

### VI.2.2 放射性同位元素 (RI) 製造

所見：

RI 利用について最も際立った研究活動は、医療診断/治療用の同位元素  $^{67}\text{Cu}$  及び  $^{211}\text{At}$  を製造する技術開発に係るものである。企業に対して行う有償のサービスとして、RI の頒布や宇宙で用いる半導体への照射も行われている。

日本では、RI 製造に適したいくつかの加速器が現在運転されているにもかかわらず、放射性医薬品の開発はほとんど確立されていない。このことは、これら加速器施設の研究者が放射性医薬品の製造と頒布を組織的に進めるための戦略について、情報交換し議論できるプラットフォームがないという事実による。

特筆すべき有益なイノベーションとして、産業用機械部品の摩耗測定を可能にするガンマ線イメージングのための装置開発が挙げられる。すでに特許申請がなされている。

提言：

NCAC は、仁科センターが、例えば日本アイソトープ協会との協力を通じて、放射性医薬品研究のプラットフォームの設立に向けて積極的な役割を果たすことを提言する。

### VI.2.3 RIBF における核変換実験

所見：

BigRIPS 及びゼロ度スペクトロメータを使用した、長寿命核分裂片 (LLFP) を核変換させるための反応断面積の測定は、「高レベル放射性廃棄物からの LLFP の分離とリサイクル」の概念を発展させることを目的とした ImPACT プログラムにおいて重要な役割を果たしている。

放射性標的核へ陽子及び中性子を入射して誘起する核反応断面積の測定が、逆反応を用いて行われている。これは RIBF でのみ可能な測定である。

提言：

NCAC は、仁科センターの ImPACT における主導的取組を奨励し支持する。LLFP の核変換に関連する逆反応測定は RIBF に特有な機能を活用しているといえる。

## VII. 理研 BNL

所見：

RBRC (理研 BNL 研究センター) は QCD 研究で世界を主導するセンターである。RBRC は世界初かつ世界唯一の偏極陽子衝突装置を BNL で稼働させる為に大きく貢献した。この施設を用いて傑出した科学的成果が達成されてきた。例えばグルーオンが陽子スピンの一部を確実に担っていることを PHENIX 実験及び STAR 実験の両方の測定で決定したことがあげられる。この特筆すべき成果は、過去 20 年に及ぶ理研の財政投資と RBRC の継続的な科学的寄与がなければ達成できなかった。

NCAC は、秋葉が現在 PHENIX 実験の代表者であることを特筆したい。

RBRC は国際的科学的協力として大きく成功したユニークなモデルであり続けている。諸大学・諸研究所に広がるRBRC研究者の世界的ネットワークには感銘を受ける。これはRBRCの科学的活力を実証するものである。

RBRCの理論研究グループは、大きな科学的インパクトを与え続けている。例えば、重イオン理論に起源を持つカイラル物質の研究では、凝縮系物理と原子核物理が融合し、今や心躍らせる実験段階に移っている。このことは分野横断型研究の威力を示す素晴らしい例であろう。格子QCDの分野では、RBRCの物理学者により開発された「全モード平均化技法」が今や世界中の格子QCDコミュニティで標準的に使用されるに至った。

提言：

RBRCを2018-2023年の期間、延長する提案には、RHIC加速器での研究プログラムを完了し、新たな研究機会を手に入れるための計画が提示されている。これにより既に得られた大量のデータの解析が可能となり、新しい検出器sPHENIXの建設と運転へのRBRCの参加が可能となり、EICに対しRBRCが寄与する可能性が広がり、カイラル物質に関する分野横断的取組を展開できるようになる。よってNCACはRBRCを2018-2023年の期間、延長するという提案を強く支持する。これにより、RHIC施設において実験、理論及び格子QCDの分野での仁科センターの素晴らしい科学的生産性が維持されるであろう。

## VIII. 理研RAL

所見：

理研RAL支所におけるミュオン科学の研究は、凝縮系物質の物性研究に焦点を当てた基礎及び応用科学での多様性に特徴があり、過去2年間の優れた論文発表の実績に裏打ちされている。研究の多様化は引続き進展しており、NCACは、電子回路基板上で動作中のICチップへの照射や負ミュオンを利用した元素分析等の新たなプロジェクトが導入されていることを評価する。高圧下のSiO<sub>2</sub> 鉱石(スチショフ石)中の中性ミュオニウムを最近観測したことは(N Funamori et al., Scientific Reports 5 (2015) 8347)、地球マントルの深部に水素が中性原子の形態で存在できるかもしれないことを示唆していて、RAL支所の創造性に富んだ学際的利用を体現する素晴らしい事例である。

理研RAL支所は、J-PARCでのミュオン施設が完全に稼働した暁には閉鎖されることが想定されている。今回、2023年までさらに5年間協力を続けるという計画が示された。計画によると、5年間RALが主に施設運転費用を、理研が主に改修費用に責任を持つというもので、施設の所有権を最終年度にRALへ移転することとなる。この間、日本の研究者の物性研究プログラムはμSR装置を備えたポートで継続され、超低速ミュオンの開発は第3ポートで、基礎物理学研究は第1ポートで研究継続されることが想定される。

提言：

NCACは、理研とRALがこの施設を5年間共同で運営するという提案を支持する。NCACは、ミュオンの利用者コミュニティを拡大するという目標に向かって、理研RAL支所とJ-PARCとが広く協力する中でユーザーの研究プログラムが行われることを待望する。NCACは、低速ミュオン技術の開発をJ-PARCでの類似技術の開発と連携して進めるよう提言する。そうすることで超低速ミュオンビームを時宜を得て完成させ、凝縮物質研究及びg-2プログラム実施のために効果的な貢献を行うことができる。

## IX. 分野横断的研究

所見：

仁科センターでは、宇宙物理学、気候学及び太陽地球系科学、電子部品の照射、学際的理論科学及び凝縮系物質科学を含む多くの優れた分野横断的研究プロジェクトが進行している。特に仁科センターと加藤分子物性研究室、光量子工学研究領域及び生命システム研究センターとの間の研究協力が強調された。これらはすべて優れたプロジェクトであるが、これら及び新規の学際研究のさらなる発展の余地があるように見える。

iTHES (理論科学連携研究推進グループ) が分野横断的研究の優れた例を提供している。

凝縮系物質科学との結びつきを強化することが、分野横断的研究の将来計画として強調された。特に理研 RAL と理研創発物性科学研究センターとの間の研究協力の拡大、 $\beta$ -NMR 及び動的核偏極 (DNP) 技術の硬軟凝縮系物質への応用が提案されている。

提言：

分野横断的研究は素晴らしい科学を産み出し、原子核の科学・技術の重要性についての認識を広めることになるので、進行中の優れた分野横断的研究は強く推奨されるべきである。iTHES の成功したモデルにしたがって、理研の他のセンターとの科学者の交流を促進すべきである。学問分野を跨る研究テーマを探求することにより、翻って原子核物理に関わる重要な問題に答える機会も生み出される。

## X. 研究戦略及び将来計画

本節では特定のテーマの事柄について述べるが、完璧を期すため、先に述べたいいくつかの所見と提言を繰り返し述べることもある。

### 1. 科学の方向性と新たな取組に関する所見：

仁科センターは、現在3つの部門で実施されている、原子核物理学、ハドロン物理学及び宇宙物理学を「宇宙核科学」という推進方針のもとで統合することを提案した。NCAC は、「宇宙核科学」というキーワードの下で首尾一貫した研究展開を行う戦略は有望であると考えられる。

RIBF 研究部門は、施設の抜きんでた科学的生産性と実験機器の性能の両者を活用して、天体物理学における r-過程の解明に特に焦点を絞り、極端なアイソスピン状態の原子核構造を調べ、新しい同位体を生成する。これらの研究は原子核物質の状態方程式 (EOS) のアイソスピン依存性の研究や、中性子星の宇宙物理学的研究によって補完される。

超重元素に関する最先端のプログラムは、 $Z=118$  を超える新しい超重元素の生成と  $Z=106\sim 112$  の重元素の化学と構造の研究に集中する。

研究プログラムの長期的将来展望は、以下に述べる加速器の性能向上に強く依存している。

世界中で建設中の RI ビーム施設により、将来的に国際競争の激化が予想される中で、仁科センターはその長期的努力を、RIBF が世界のどこでも行えない最もインパクトの高い実験を実施できるという貴重な能力を発揮させることに集中させるべきである。提案された高度化計画に対して能力の比較が初めてなされたが、他の施設、特に FRIB と FAIR と比較したときに、将来の RIBF の科学的生産性と実験機器の性能の組合せがもたらす独特な科学的優位性を明確にするよう、

さらなる作業を行ってほしい。

RIBF では、希少 RI リング、SLOWRI 及び SCRIT 等、研究プログラム実施の上でユニークな能力を発揮する新しい実験装置がこの中期計画期間中に運転を開始した。SCRIT は、その主要な目標の一つである  $^{137}\text{Sn}$  の有意な測定に必要なルミノシティを達成すべく、さらなる性能向上を図る必要がある。

低エネルギーの RI ビームの開発が進められているが、諸外国の ISOL 施設において再加速によって得られる RI ビームの能力や、FRIB での RI 再加速装置の能力とは相補的な能力を発揮する独特のプログラムを立案すべきである。

提言：

NCAC は RIBF 研究部門の全体の科学研究戦略を強く支持するが、その一方で仁科センターは、RIBF が中長期的に独特の優位性を保ち得る科学プログラムと技術的能力を見極めるべく、より詳細な検討を実施すべきである。

新しい実験装置の開発は、RIBF のユニークな研究能力をさらに強化するという観点から評価されるべきである。

## 2. 宇宙核科学戦略に関する所見：

「宇宙核科学」戦略のもとで、素粒子物性研究部門の計画は、以下に焦点を当てている。BNL と強い研究協力関係を継続し、ハドロンや原子核がいかにかクォーク-グルーオンプラズマ状態になるか、あるいはいかにかクォーク-グルーオンプラズマからハドロンや原子核が作られるかの理解を進めること、RHIC 実験での核子スピン構造の解明、sPHENIX への注力、並びに J-PARC におけるハドロン物理プログラムである。

提言：

素粒子物性研究部門の将来の方向性は、この部門を率いることになる新しい主任研究員の強い関与のもと、さらに磨きをかけてほしい。またハドロン物理の実験プログラムと最先端の理論研究活動との連携を強化すべきである。

NCAC は提案された RBRC の 2018-23 年の間の延長を強く支持する。これにより RHIC 施設における実験、理論及び格子 QCD の分野で、センターの素晴らしい科学的生産性が維持される。

## 3. 理論研究部門に関する所見：

理論研究部門は「宇宙核科学」戦略の重要な柱と考えられるが、初田が今中期計画の中で iTHES に移ることが予期され、准主任研究員の幾人かが大学の教授職に転身したことで、その将来は不確かである。

提言：

幅広くかつ国際的に競争力の高い原子核理論プログラムの将来を確実にするため、初田主任研究員の後任ポストはできるだけ早く埋められなければならない。これまでの NCAC 提言を再確認し、本 NCAC は仁科センター内外での不安定核ビーム物理のプログラムに対する支援と科学的指針の提供のために、現代的な原子核構造の理論分野において終身雇用のポストを作るよう求める。

#### 4. 応用研究に関する所見：

放射性同位元素トレーサーの製造と頒布に限らず、放射性廃棄物の核変換や重イオンビーム育種に特に焦点を絞ることにより多面的な応用研究プログラムが継続されるであろう。

##### 提言：

NCAC は、現行の強固な研究プログラムの上に、社会に恩恵をもたらす応用研究をさらに強化していくことを提言する。優れた成果を上げている育種プログラムについては、時宜にかなった引継ぎ計画を立てることが重要である。

#### 5. 理研 RAL に関する所見：

理研 RAL のミュオン施設は理研により大きな改修を行い、5年の共同運営の後、施設の所有権を RAL に移管することが提案されている。

##### 提言：

NCAC は、新たな協力の枠組みの中で理研 RAL 支所を期限付きで5年間存続させるという共同プログラム提案を支持する。一方、NCAC は J-PARC との幅広い協力の中でのユーザーの研究プログラムをミュオンのユーザーコミュニティを拡大する形で実現することを望む。また、NCAC は低速ミュオン技術の開発を J-PARC での技術の開発と連携して進めることを提言する。そうすることによって、凝縮物質及び g-2 プログラムのための超低速ミュオンビームのタイムリーな実現に効果的に寄与できると期待する。

#### 6. 加速器に関する所見－技術的観点：

仁科センターの加速器複合体に関する戦略将来計画は二つの主要な構想からなっている：  
(1) サイクロトロン群のビーム強度を 30 倍向上させること、(2) 超重元素プログラムのためにブースターニアックのエネルギーを増大させること。

##### 提言：

NCAC は、施設高度化の詳細計画をさらに最適化することを提言する。超電導 RF 加速空洞技術の研究開発は、KEK のような経験豊富な研究所との協力のもとで進めるべきである。加速器施設増強の戦略計画は 10 年以上の期間の将来をカバーすべきであり、期待される性能は世界で完成予定の他の施設に対する競争力を持たなければならない。

#### 7. 科学的管理運営に関する所見：

理研の人事制度改革が仁科センターへ及ぼす影響の全貌は未だに明確ではないが、NCAC は、仁科センター内の現行の終身雇用と任期雇用スタッフの混合で研究室がうまく運営されており、また施設運営に関わる専門能力の継続性が維持されることが本質的に重要であるということを強調したい。

仁科センターの研究活動の現在のポートフォリオは、強みのある分野に集中しかつ学際的研究活動への寄与を許す多様性を維持しており、健全なバランスがとれていることを示している。

分野内の異なる小研究領域間での相乗的共同研究活動は有益であり、さらに促進されるべき

である。

提言：

仁科センターの組織運営構造上の最適戦略を立案する際には、運営責任者は異なる資金調達シナリオを比較考慮し、それぞれのもたらすインパクトを熟慮すべきである。

## XI. NCAC2014 提言に対する対応

委員会は、仁科センターの運営管理者及びスタッフが前回提言に対して数多くの行為で答えてくれた努力に謝意を表す。

NCACは、RIBFにおける運転時間の追加要求がより多くの資金を必要とし、外部の新しい資金源を検討しなければならないことを理解している。しかし、共同研究での必要とされる実験装置を設置するため、現物支給で協力するという、これまで成功してきた協力体制は維持されるべきである。RIBF 施設は、アカデミックな研究に対するオープンアクセスルールを引き続き堅持すべきである。

RIBF 高度化プロジェクトは、中性子過剰な原子核と超重元素の両方の生成能力を増大するという二つの明確な方向性を掲げており健全である。他の施設と比較した場合の科学プログラムの独自性はさらに検討されるべきで、適切に発展させ続けなければならない。

応用研究に関していくつかの新たな取組がなされている。「RI ビームを使用した摩耗検査試験」はすでに理研に収入をもたらしている。 $^{211}\text{At}$ を使用した核医薬品の研究開発、「物質科学及び生命科学における動的核偏極(DNP)及び $\beta$ -NMR 分光」が新しく提案された。新型ゲル線量計の開発は商業利用をめざして理研の産業連携本部に引き継がれた。

イオンビーム育種は引き続き仁科センターのミッションとして行われている。産業界との連携が拡大強化されているが、加速器の商業利用をさらに増やすためには研究者側に十分なインセンティブがあることが必要である。この仕組みをうまく作ることは挑戦的であり、そのための検討がなされているものの、なお多くは途上である。

NCACは、RBRC及び理研RALでの共同研究を継続させるという素粒子物性研究部門の将来計画を支持する。

前述したように、将来計画の提案に基づきRBRCを2018-2023年の間延長すれば、RHIC加速器での科学プログラムを完了することができるばかりでなく、新しい研究機会を得ることになる。延長により既に得られた大量のデータの解析が可能となり、新しい検出器 sPHENIX の建設と運転へのRBRCの参加が可能となり、EICに対しRBRCが寄与する可能性が広がり、カイラル物質に関する分野横断的取組を展開できるようになる。よってNCACはRBRCを2018-2023年の期間、延長するという提案を強く支持する。これにより、RHIC施設において実験、理論及び格子QCDの分野での仁科センターの素晴らしい科学的生産性が維持されるであろう

以前のレビューでは、理研RALの研究は、2018年までにJ-PARCに移転する計画であった。新たな計画では、ISISとの共同プログラムを通して5年をかけた円滑な移行が予定されている。理研RALと創発物性科学研究センターとの共同研究が開始され、将来の戦略的協力を計画することが期待される。創発物性科学研究センターと一緒に、RBRCの原子核理論研究者がカイラル磁気効果について共同研究を進めており、2016年後半に理研で共同ワークショップが開催される。

仁科センターでの人員採用が棚上げされていることは不幸なことである。これまでなされた人員

獲得の努力にもかかわらず、大切な専門能力を保持し、効果的な継承計画を確実に行うための人員の採用を進めることは、依然として決定的に重要な課題として残っている。

NCAC は、仁科センターにおける理論研究の将来について極めて憂慮している。現在の状況は 2014 年のレビュー時よりも悪化している。上で述べた提言を再確認するが、NCAC は、仁科センター内外での RI ビームを使った実験プログラムを支援するため、現代的な原子核構造理論研究を行う終身雇用のポストを作るよう強く勧める。

仁科センター諮問委員会

シドニー ガレス

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'Sydney Gales', written in a cursive style.

NCAC 議長

<p>諮問事項 1</p>	<p><b>【強み】</b>RI ビームファクトリーの高性能, 超重元素研究, 中性子過剰 RIビームの供給強度, RHIC での物理研究, 格子 QCD, イオンビーム育種。</p>	<p><b>【弱み】</b>RIBF ビームタイム不足。施設運転人員の不足。理研の人事政策が不透明。RIBF の理論研究への支援が欠如。</p>
<p>仁科センターの使命は成功裏に達成されている。RIBF の持つ潜在的な研究能力を十全に活用することが本質的に重要。仁科センターは RIBF 高度化計画を進展させなければならない。RHIC における sPHENIX への貢献, RIBF 理論の強化, 応用と分野横断的研究開発の強化, 以上に注力すべき。</p>		
<p>諮問事項 2</p>	<p>RIBF 施設は最盛期にあり, 現在このセンターを再編する必要性はない。仁科センターは iTHES, 光量子工学研究領域 (RAP), 創発物性科学研究センター (CEMS), 生命システム研究センター (QBiC), 計算科学研究機構 (AICS), ライフサイエンス技術基盤研究センター (CLST) との共同研究を強化すべきである。有望な新しい取組が多く芽吹いている。</p>	
<p>研究資源投入の中心は当センターの学問の源流である原子核物理学におかれなければならない, それはすなわち, 世界を主導する加速器施設及び実験装置の技術に立脚した「宇宙核科学」研究である。</p>		
<p>諮問事項 3</p>	<p>仁科センターは 5 つのイニシアティブにおいて卓越した成果を上げている。特記するならば, RIBF は原子核科学において世界を主導するハブである。RIBF, BNL 支所及び RAL 支所を擁することにより, 仁科センターは世界的な科学者を育てて, 最高レベルの頭脳循環を提供する場所となっている。ImPACT/SIP プログラムは新しい研究の最前線を切り開いている。</p>	
<p>NCAC は, RIBF での研究をさらに発展させるために 8 か月運転が必要であると繰り返す。世界的研究プログラムを維持発展させるための人材戦略を立てることが必須である。RIBF 研究プログラムを支援し指導する理論分野を強化するべきである。</p>		
<p>諮問事項 4</p>	<p>113 番元素に提案された「ニホニウム」という名称は, 研究及び技術開発において理研が世界的リーダーであることを象徴的に示した。前人未踏のウランビーム強度を誇る RIBF 加速器は, RIBF, BNL 及び RAL に形成されている非常に効果的な科学ハブの存在とともに, 理研の成果と評判に大きく寄与している。</p>	