

FOUNDATION FOR HIGH ENERGY ACCELERATOR SCIENCE



# 2025.3 第29号

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 ■ 広報誌「FAS だより」第 29 号の発行に当って

- 広報誌「FAS だより」も公益財団法人に移行してから第 29 号を発行することになりました。
- 当財団では、ホームページや広報誌「FAS だより」などで加速器科学に関する知識の普及 啓発活動を行っておりますが、是非ご覧いただき、より良いものにするために皆様のご意見 をお寄せください。
- また賛助会員の皆様で、広報誌「FAS だより」に投稿したい高エネルギー加速器に関する 記事等がございましたら是非投稿ください。お待ちしております。

<連絡先 : info@heas.jp 又は TEL/FAX 029-879-0471>

公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 事務局

# FAS だより 第 29 号 目次

	2025年	3月
1.	国際交流助成報告	
	1) REBCO 線材内部の REBCO/Ag 界面と Ag/Cu 界面の層間抵抗の個別評価についての	
	ASC2024 国际会議 Cの発表 車北大学大学院工学研究科 佐藤 光一	1
	<ul> <li>2) Advances in High-Intensity Positron Source Physics and Technologies (AHIPS-2024) Workshop</li> </ul>	1
	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 和田 健	8
2.	国際会議等助成	
	ERL2024 ワークショップ開催報告	
	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設(阪井 寛志・島田 美帆	13
	第 4 回 J-PARC シンポジウム 2024 開催報告	
	J-PARC センター 小林 隆・田村文彦	16
3.	SPring 8の現状と展望	
	理化学研究所 放射光科学研究センター 矢橋 牧名	20
4.	研修会等の開催報告	
	<ol> <li>高エネルギー加速器セミナー(OHO'24)開催報告</li> <li>2)第4回加速即体計体計体</li> </ol>	32
	2) 弟 4 回加速器施設採訪会美施報告 3)「科学と音楽の饗宴 2024」開催報告	34
5	2024年度宣エラルギー加速思利受研究将码合将码堂	
5.	2024 年度同工不ルイー加速品科子研究突励云突励員 1) 西川賞 全 炳俊	38
	「先端利用研究のための中赤外自由電子レーザーの開発」	
	2)西川賞  冨澤 正人	39
	「J-PARC 主リングにおける遅い取り出し運転の性能向上についての研究」	
		39
	「スーハーカミオカンテにおける超新星ニュートリノ観測技術の開拓」 4) 小哔賞 - 岡田 信二・山田 直地・橋木 直・歯村 拓馬	40
	4) 万朱貢 岡田 信二 田田 英巴 福平 邑 英村 招将	40
	5) 小柴賞   春山 富義	41
	「大規模液体キセノン粒子検出実験を可能としたパルス管冷凍機の開発」	
	6) 熊谷賞 古矢 勝彦	41
	「加速器用電源の開発及び製造」	
6.	奨励賞授与式に関する科学新聞記事	43
7.	2025 年度事業計画	44
8.	2025 年度収支予算	47
9.	賛助会員一覧(2025年1月1日現在)	48

# REBCO 線材内部の REBCO/Ag 界面と Ag/Cu 界面の層間抵抗の個別評価につ いての ASC2024 国際会議での発表

東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 佐藤 光一

#### 1.背景

高温超伝導線材である REBCO 線材は低温超 伝導線材に比べて、高い臨界温度を有し、運転 温度を同一とした場合、高磁場下でも高い臨 界電流密度を示す。これらの特性を生かして、 様々な応用機器が研究されており[1]、例えば、 MRI/NMR 用マグネット [2]、粒子加速器用の 双極、六重極マグネット [3,4]、核融合マグネッ ト [5]、送電ケーブル [6] などがある。REBCO 線材の接合はこれらのマグネットを構成する 直列コイルや長尺の送電ケーブルを製造する ために必要不可欠である。超伝導接合 [8] によ り永久電流モードで運転される MRI/NMR 用マ グネットを除けば、低抵抗接合が一般的に加 速器マグネット [9]、核融合用マグネット [10]、 送電ケーブル [11] などで多く利用されている。 低抵抗接合としてはいくつかの研究がなされて おり、例えば半田接合 [9,11]、インジウム接合 [6,10]、銀、銅の拡散接合 [12,13]、超音波接合 [14]、金属ナノ粒子ペーストを用いた焼結接合 [15] などがある。接合抵抗が非常に小さくなる ような良好な低抵抗接合の場合、REBCO 線材 内部の REBCO/Ag 界面と Ag/Cu 界面に存在す る層間抵抗が接合抵抗に対して支配的になる。 REBCO/Ag 界面と Ag/Cu 界面の層間抵抗率(単 位面積相当の抵抗:層間抵抗は面積に反比例す る) である r<sub>REBCO/Ag</sub> と r<sub>Ag/Cu</sub> は製造会社や製造 番号 [10,16]、温度や磁場 [17] によって異なる ことが報告されている。

いくつかの研究 [14,18,19] では接合抵抗の要 因を分析する際、r<sub>Ag/Cu</sub>をゼロと仮定している。 一方で $r_{Ag/Cu}$ にいくらかの値があると仮定して いる文献 [20] もある。 $r_{Ag/Cu}$ が存在することを 示唆する事例としては、REBCO 線材を加熱し た際に、銅酸化物が両界面に生成されることを 報告した文献 [21] や、機械的接合(Dry Joint) において、銅安定化層がない REBCO 線材の接 合抵抗の方が、銅安定化層がある場合よりも小 さかったことを報告した文献 [22] がある。加 えて、 $r_{REBCO/Ag}$  と $r_{Ag/Cu}$ の合計値の磁場依存性は 温度によって変化し [17]、その挙動は定性的に 金属と酸化物の双方の抵抗の温度磁場依存性が 表れたものと解釈しうるものであった。しかし ながら、定量的評価のためには $r_{REBCO/Ag}$  と $r_{Ag/Cu}$ の割合、およびそれぞれの温度磁場依存性を明 らかにする必要がある。

本研究では、まず層間抵抗率の非破壊検 査技術であるコンタクトプローブ CTL 法 [6,16,23,24] を用いて、 $r_{\text{REBCO/Ag}} \ge r_{Ag/Cu}$ を個別 に評価する方法を確立することを試みた。次 に、77 K、自己磁場下で確立した方法を元に、  $r_{\text{REBCO/Ag}} \ge r_{Ag/Cu}$ の割合を実験的に評価した。さ らに、様々な温度でこの2つの層間抵抗率の合 計値の磁場依存性を測定し、測定データを元に  $r_{\text{REBCO/Ag}} \ge r_{Ag/Cu}$ の個別の温度磁場依存性につい て議論した。

#### 2.原理

Fig. 1 にコンタクトプローブ CTL 法の概略 図を示す。本手法では、直径 50 µm の一対の 電流リードを使って、REBCO 線材の金属表面 に電流を印可する。電流は金属層から REBCO 層に転流するが、この時、金属表面の電位は REBCO 線材の長手方向に沿って、指数関数的 に減少する。ここで電位が 1/e になる距離を CTL (転流距離)と定義する。CTL は 7 本のポ テンシャルプローブで測定され、ポテンシャ ルプローブの直径は 30 µm、間隔は 50 µm であ る。なお、電流リードに一番近いポテンシャ ルプローブは電流リードの中心から 80 µm の 距離にある。CTL は層間抵抗率と金属層の抵 抗に依存するため、金属層の厚さが固定されて いる場合、層間抵抗率は実験的に測定された CTL から求めることができる。なお、CTL と層 間抵抗率の関係(校正曲線)は数値計算によっ て求める。数値計算の詳細については次節で述 べる。Fig. 2 に Cu 層、Ag 層の厚さがそれぞれ 20 µm、1.6 µm の REBCO 線材の校正曲線の例 を示す。





Fig.2 CTL と層間抵抗率の校正曲線の例

#### 3. 数値計算

Fig. 3 に銅安定化層がある場合と無い場合そ れぞれで電位分布を評価するための数値計算体 系を示す。各金属層の厚さは次節の実験で使用 する REBCO 線材のものと同様である。支配方 程式、境界条件は過去の研究 [17] と同じであ る。電位分布は *r*<sub>REBCO/Ag</sub> と *r*<sub>Ag/Cu</sub>の値だけでな く、温度や磁場によっても変化する。Fig. 4 に 銅安定化層のある場合、無い場合それぞれの REBCO 線材表面の電位分布を示す。銅安定化 層がある場合、r<sub>REBCO/Ag</sub>とr<sub>Ag/Cu</sub>の合計値を固定 して、その割合を変化させても電位分布はほと んど変化しない。したがって、コンタクトプロー ブ CTL 法では銅安定化層がある REBCO 線材 に対して、層間抵抗率の個別評価を直接行うこ とはできない。この結果を踏まえ、初めに銅 安定化層がある REBCO 線材の CTL を測定し、 続いて銅安定化層を除去し、CTL を再度測定 する手順を取ることとした(詳細については次 節で述べる)。Fig. 4より、銅安定化層が無い 場合では、r<sub>REBCO/Ag</sub>が小さいほど、転流距離が 短くなることが分かる。ここで正確に CTL を 測定するためには、電流リードに近いほうから 3本以上のポテンシャルプローブで電圧を測定 する必要がある。10 T の高磁場下では、ノイ ズにより測定できる電圧が小さくなり、測定で きる  $r_{\text{REBCO/Ag}}$ は 10 K では 3 nΩ・cm<sup>2</sup>、70 K で は 6 nΩ・cm<sup>2</sup> であるが、一方で、77 K, 自己磁 場下では 2 nΩ・cm<sup>2</sup> である。今後の研究で、高 磁場下での評価を行うためにコンタクトプロー ブユニットの構造と測定体系の改善を行う予定 である。このような状況のため、今回の研究で は、r<sub>REBCO/Ag</sub>とr<sub>Ag/Cu</sub>の個別評価実験については 77 K、自己磁場下でのみ実施した。



(b) 銅安定化層無し



Fig.4 REBCO 線材表面の電位分布

#### 4.実験

#### 4.1. サンプル準備と方法

サンプルとして Cu 層、Ag 層の厚さがそれ ぞれ 20  $\mu$ m、1.6  $\mu$ m である SuperPower 社製の REBCO 線材を使用した。層間抵抗率の個別評 価のために、まず、銅安定化層付きの REBCO 線材の CTL を測定して、 $r_{\text{REBCO/Ag}} \ge r_{\text{Ag/Cu}}$ の合 計値を評価し、続いて、Cu 層を除去した同じ REBCO サンプルの CTL を測定して  $r_{\text{REBCO/Ag}} \ge$ 評価した。 $r_{\text{Ag/Cu}}$  は  $r_{\text{REBCO/Ag}} \ge r_{\text{Ag/Cu}}$ の合計値か ら  $r_{\text{Ag/Cu}}$ を差し引くことで求めることができる。

Cu 層の除去には銅選択エッチング液(4.5% 硫酸、4%リン酸、1% 過酸化水素、0.2% 硫酸 第二銅・五水和物)を用いた。Fig. 5 にエッチ ング体系の写真を示す。エッチング液の温度は 30 ℃または 40 ℃、攪拌部からの距離は 1 cm または 2 cm、攪拌部の回転速度は 200 rpm と した。それぞれの条件に対してサンプル数を 3 とし、各サンプルに対して臨界電流( $I_c$ )測定、 CTL 測定を行った。

*r*<sub>REBCO/Ag</sub> と *r*<sub>Ag/Cu</sub> の合計値を評価するための CTL 測定はエッチング前の Cu 層がある
 REBCO 線材に対して、液体窒素浸漬冷却体系(77 K、自己磁場)と伝導冷却体系(10-70 K、0-15 T、磁場 B は REBCO の c 軸と平行)でそれぞれ行った。エッチング後、*r*<sub>REBCO/Ag</sub> を評価するための CTL 測定は液体窒素浸漬冷却体系

でのみ行った。CTL 測定時には Keithley 6221 交流直流電源を用いて、振幅が 100 mA、周波 数が 10 Hz の方形波を電流リードに印可し、同 時に各ポテンシャルプローブ位置での電圧を Keithley 2182 A ナノボルトメータを使用して測 定した。



Fig.5 エッチング体系の写真

最後に得られたデータに基づいて層間抵抗 率の温度・磁場依存性の分析を行った。手順 は次の通りである。1)77 K、自己磁場下で の*r*<sub>REBCO/Ag</sub> と*r*<sub>Ag/Cu</sub>の割合を実験的に評価する。 2)*r*<sub>Ag/Cu</sub>の温度・磁場依存性は Ag と Cu の体 積抵抗率に基づいて、計算する。3)*r*<sub>REBCO/Ag</sub> を 1)、2)と10-70 K、0-15 T で実験的に求めた *r*<sub>REBCO/Ag</sub> と*r*<sub>Ag/Cu</sub>の合計値を使って計算する。

#### 4.2. 結果と考察

Fig. 6 にエッチング条件と臨界電流減少量の 関係を示す。縦軸 $I_c$ はエッチング前の元の臨 界電流値で規格化したものである。温度 30 °C、 距離 2 cm が 4 つの条件の中で比較的臨界電流 減少量が小さいエッチング条件となった。Fig. 7 に 77 K、自己磁場下での層間抵抗率とエッチ ング条件の関係を示す。今回用いた線材では  $r_{\text{REBCO/Ag}}$ は $r_{\text{Ag/Cu}}$ よりも小さく、 $r_{\text{REBCO/Ag}}$ と $r_{\text{Ag/Cu}}$ の平均値はそれぞれ 2.4 n $\Omega$ ・cm<sup>2</sup> と 8.4 n $\Omega$ ・cm<sup>2</sup> であった。さらに、層間抵抗率と臨界電流減少 量に相関関係はなかった。Fig. 8 にエッチング したサンプル表面の写真を示す。深刻な臨界電 流劣化が見られた条件 30 °C、1 cm の第 3 サン プルでは銀層表面に小さな穴が存在し、穴の周

囲の Ag 層は REBCO 層から剥離しているよう に見られた。したがってエッチング液が穴を通 じて REBCO 層に侵入し、I。劣化を引き起こし た可能性がある。一方で、規格化された Ic が 0.8 以上を示す条件 30 ℃、2 cm の第1 サンプルで は剥離した領域があるような穴が存在しなかっ た。ここで Fig. 8(a) において、穴と剥離領域が 表面全体の70%以上を占めていなかったため、 I.劣化の原因としては、エッチング処理やサン プルを取り扱う際の線材のひずみなど、他の 要因も考えられる。一方、コンタクトプローブ CTL 法では Ag 層が存在する領域中の局所的な 層間抵抗率を評価しており、これが、層間抵抗 率が I. 劣化の影響を受けなかった理由である と考えられる。今後、さらなるエッチング処理 の最適化と複数箇所での層間抵抗率の測定も予 定している。

金属 / 金属界面の接触抵抗は界面を構成する 物質の抵抗率に比例する [25]。本研究では *r*<sub>Ag/Cu</sub> に対する Ag と Cu の寄与を同じであると仮定し



Fig.6 エッチング条件と臨界電流減少量の関係



Fig. 7 エッチング条件と層間抵抗率の関係

て、温度・磁場依存性の計算をした。77 K、自
 己磁場下での値として、前段落で得た *r*<sub>REBCO/Ag</sub>
 と *r*<sub>Ag/Cu</sub> の平均値を利用した。Fig. 9、Fig. 10 に
 前節で示した手順に基づいて推定した層間抵抗
 率を示す。



Fig. 8 エッチングサンプルの表面画像:(a) レーザー 顕微鏡で観察した 30℃、1 cm の第 3 サンプルの表面 画像、(b) 偏光顕微鏡で観察した 30℃、2 cm の第 1 サ ンプルの表面画像



Fig.9 層間抵抗率の磁場依存性:(a) 10 K,(b) 70 K



Fig. 10 層間抵抗率の温度依存性

r<sub>Ag/Cu</sub>は温度の増加に伴って増加するため、 70 K では r<sub>Ag/Cu</sub> は r<sub>REBCO/Ag</sub> より大きいが、10 K では 15 T を除いて、 $r_{\text{REBCO/Ag}}$ より小さくなっ た。r<sub>REBCO/Ag</sub>は10Kでは磁場の増加に伴って、 減少したが、70Kでは磁場の増加に伴って、 一定もしくは増加の傾向が見られた。さらに、 r<sub>REBCO/Ag</sub>は自己磁場下では温度の上昇に伴って、 減少した。この振る舞いは REBCO/Ag 界面付 近にできた常伝導体の REBCO の存在によると 仮定できる。 文献 [26] によると、 臨界電流が 65 KのYB<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>67</sub>の c 軸方向の常伝導抵抗は 磁場の増加に伴い、減少する。さらに、その減 少率は温度増加に伴い低下する。また当該常伝 導抵抗は自己磁場下において温度増加に伴い減 少する。これは84K以上の高温の事例である が、r<sub>REBCO/Ag</sub>の振る舞いと似た挙動となってい る。この挙動の詳細分析・定量的評価のために、 界面付近での結晶構造の分析と抵抗のモデル化 を今後の研究として実施する予定である。

#### 5.まとめ

本研究では、まず、数値計算に基づいて、コ ンタクトプローブ CTL 法による *r*<sub>REBCO/Ag</sub> と *r*<sub>Ag/Cu</sub> の個別評価の可能性について議論した。結果と して、無加工の銅安定化層付き REBCO を使う だけでは個別評価は不可能であり、*r*<sub>REBCO/Ag</sub> の みを独立に評価するために銅安定化層を除去す る必要があることが分かった。提案された手 順に基づた CTL 測定によって、77 K、自己磁 場下では r<sub>Ag/Cu</sub> は r<sub>REBCO/Ag</sub> よりも 2 から 3 倍大 きいことが分かった。また、CTL 測定と接触 抵抗の理論に基づき、r<sub>REBCO/Ag</sub> の温度・磁場依 存性を計算し、常伝導 REBCO の体積抵抗率の 挙動と定性的に類似した傾向となることを示し た。これは REBCO/Ag 界面付近に存在する常 伝導体の REBCO が r<sub>REBCO/Ag</sub> の原因となってい る可能性を示唆しており、今後改善したコン タクトプローブ CTL 法による r<sub>REBCO/Ag</sub> の温度・ 磁場依存性評価、REBCO/Ag 界面付近の結晶 構造の分析を行うことで、詳細分析を行う予定 である。

#### 6. 謝辞

本研究内容は、公益財団法人高エネルギー 加速器科学研究奨励会の渡航費支援を受 け、Applied Superconductivity Conference 2024 (Salt Lake City, Utah, USA) にて発表されまし た。また、本研究は東北大学金属材料研究所 附属強磁場超伝導材料研究センターにおける 共同研究(課題番号 202212-HMKGE-0201、 202312-HMKGE-0201)により実施されたもの です。

#### 7.参考文献

- [1] S. Nishijima *et al.*, "Superconductivity and the environment: a roadmap," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 11, Nov. 2013, Art. no. 113001, doi: 10.1088/0953-2048/26/11/113001.
- [2] Y. Yanagisawa, M. Hamada, K. Hashi, and H. Maeda, "Review of recent developments in ultrahigh field (UHF) NMR magnets in the Asia region," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 4, Apr. 2022, Art. no. 044006, doi: 10.1088/1361-6668/ac5644.
- [3] X. Wang et al., "A viable dipole magnet concept with REBCO CORC® wires and further development needs for high-field magnet applications," Supercond. Sci. Technol., vol. 31, no. 4, Apr. 2018, Art. no. 045007, doi: 10.1088/1361-6668/aaad8f.

- [4] K. Tsuchiya *et al.*, "Prototype HTS sextupole magnet for SuperKEKB interaction region," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 4002604, doi: 10.1109/ TASC.2019.2898329.
- [5] P. Bruzzone *et al.*, "High temperature superconductors for fusion magnets," *Nucl. Fusion*, vol. 58, no. 10, Oct. 2018, Art. no. 103001, doi: 10.1088/1741-4326/aad835.
- [6] S. Ito, H. Hashizume, N. Yanagi, and H. Tamura, "Advanced high-temperature superconducting magnet for fusion reactors: Segment fabrication and joint technique," *Fusion Eng. Des.*, vol. 136, no. A, pp. 239–246, Nov. 2018, doi: 10.1016/ j.fusengdes.2018.01.072.
- [7] D. I. Doukas, "Superconducting transmission systems: review, classification, and technology readiness assessment," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 5401205, doi: 10.1109/TASC.2019.2895395.
- [8] Y. Takeda, H. Meada, K. Ohki, and Y. Yanagisawa, "Review of the temporal stability of the magnetic field for ultra-high field superconducting magnets with a particular focus on superconducting joints between HTS conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 4, Apr. 2022, Art. no. 043002, doi: 10.1088/1361-6668/ac5645.
- [9] X. Wang, M. Uchida, K. Tsuchiya, A. Terashima, T. Takao, and A. Kikuchi, "Splice resistance measurements of REBCO tapes for a REBCO sextupole magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 8800905, doi: 10.1109/TASC.2019.2908603.
- [10] S. Ito, H. Tamura, N. Yanagi, and H. Hashizume, "Low-resistance joint development for segment-fabrication of high-temperature superconducting fusion magnets," *Nucl. Fusion*, vol. 61, no. 11, Nov. 2021, Art. no. 115002, doi: 10.1088/1741-4326/ac269e.
- [11] S. Mukoyama et al., "Development of YBCO

high-Tc superconducting power cables," *Furuakwa Rev.*,no. 35, pp. 18–22, Mar. 2009, [Online]. Available: https://www.furukawa. co.jp/review/fr035/fr35\_04.pdf

- J. Kato *et al.*, "Diffusion joint using silver layer of YBCO coated conductors for applications," *Physica C*, vol. 468, no. 15–20, pp. 1571–1574, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.physc.2008.05.261.
- [13] N. Chikumoto, and S. Kato, "Development of direct joint process using Cu stabilizing layers of REBCO tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, no. 3, May 2024, Art. no. 6600704, doi: 10.1109/TASC.2024.3351118.
- [14] H.-S. Shin, J.-M. Kim, and M. J. Dedicatoria, "Pursuing low joint resistivity in Cu-stabilized REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>δ</sub> coated conductor tapes by the ultrasonic weld–solder hybrid method," *Supercond. Sci, Technol.*, vol. 29, no. 1, Jan. 2016, Art. no. 015005, doi: 10.1088/0953-2048/29/1/015005.
- [15] C.-M. Yang, Y.-C. Chang, C.-L. Chang, and I.-G. Chen, "Sintering nano-silver paste by resistive joule heating process for 2G HTS tape joints," *Materials*, vol. 15, no. 4, Feb. 2022, Art. no. 1571, doi: 10.3390/ma15041571.
- [16] N. Bargrets, R. Nast, J.-H. Fournier-Lupien, F. Sirois, G. Celentano, and K.-P. Weiss, "Current transfer length and interfacial resistance between superconductors and metals in commercial REBCO tapes and cables," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, no. 6, Sep. 2021, Art. no, 6601508, doi: 10.1109/TASC.2021.3085359.
- [17] Y. Atake, S. Ito, K. Takahashi, and H. Hashizume, "Evaluation of magnetic field dependence of the interface resistivity in REBCO tape," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Sep. 2022, Art. no, 4803205, doi: 10.1109/TASC.2022.3186268.
- [18] N. Bagrets, K.-P. Weiss, R. Nast, and R. Heller, "Correlation between resistances of face-to-face soldered joints and

interface resistance between layers in superconducting tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 4, Jun. 2018, Art. no. 6600204, doi: 10.1109/ TASC.2017.2784961.

- [19] Y. Tsui, E. Surrey, and D. Hampshire, "Soldered joints—an essential component of demountable high temperature superconducting fusion magnets," *Supercond. Sci, Technol.*, vol. 29, no. 7, Jul. 2016, Art. no. 075005, doi: 10.1088/0953-2048/29/7/075005.
- [20] S. Ito, Y. Seino, T. Nishio, H. Oguro, H. Hashizume, "Structure and magnetic field dependences of joint resistance in a mechanical joint of REBCO tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, Jun. 2016, Art. no. 6601505, doi: 10.1109/TASC.2016.2539210.
- [21] J. Lu, Y. Xin, B. Jarvis, and H. Bai, "Oxygen out-diffusion in REBCO coated conductor due to heating," *Supercond. Sci, Technol.*, vol. 34, no. 7, Jul. 2021, Art. no. 075004, doi: 10.1088/1361-6668/abfd0c.
- [22] K. Kawai et al., "Optimization of a mechanical bridge joint structure in a stacked HTS conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun. 2013, Art. no. 4801704, doi: 10.1109/TASC.2013.2239335.
- [23] R. Hayasaka, S. Ito, and H. Hashizume, "Evaluation of interface resistance in a REBCO tape at different temperatures by contactprobing current transfer length method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol, 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 9000805, doi: 10.1109/ TASC.2019.2895603.
- [24] Y. Atake. S. Ito, K. Takahashi, and H. Hashizume, "Evaluation of the interface resistance on heated REBCO tape," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, Aug. 2023, Art. no. 6600604, doi: 10.1109/ TASC.2023.3240387.

- [25] N. K. Myshkina, M. Braunovich, and V. V. Konchits "The mechanics and tribophysics of electrical contacts," *J. Frict. Wear*, vol. 36, pp. 454–467, Dec. 2015, doi: 10.3103/S1068366615060112.
- [26] Y. F. Yan, P. Matl, J. Harris, and N. P. Ong, "Negative magnetoresistance in the c-axis resistivity of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCuO<sub>8+8</sub> and YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+x</sub>," *Phys. Rev. B*, vol. 52, no. 2, pp. R751–R754, Jul. 1995, doi: 10.1103/PhysRevB.52.R751.

# Advances in High-Intensity Positron Source Physics and Technologies (AHIPS-2024) Workshop

## 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設 和田 健

2024年10月にフランス・オルセーにある Le laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab) にて、国際ワークショッ プ「Advances in High-Intensity Positron Source Physics and Technologies (AHIPS-2024)」が対面 形式で開催されました。本ワークショップは、 高強度陽電子源の物理と技術の進歩に関するも ので、IJCLab の高エネルギー物理学関連の加 速器研究者によって開催されました。これまで この分野の会議への参加の機会が少なかった、 低速陽電子ビームを利用する物性研究分野の研 究者、例えば私のような研究者にも、主催者か ら参加が呼びかけられ、参加をすることになり ました。

「低速陽電子ビーム」という言葉にあまり馴 染の無い読者もおられると思われますので、簡 単に説明をいたします。「低速陽電子ビーム」 とは、アイソトープのβ<sup>+</sup>崩壊や加速器によっ て生成された広いエネルギー分布を持つ白色陽 電子を、陽電子特有の方法で単色化したエネル ギー可変陽電子ビームのことです。陽電子に対 しては、タングステン(W)、ニッケル(Ni)、 白金 (Pt) など負の陽電子仕事関数を持つ物質 が存在します。物質中で陽電子は散乱を繰り返 しエネルギーを失って熱化しますが、その後、 拡散(酔歩)によって一部の陽電子が表面に到 達し、負の仕事関数を持つ物質の場合にはそ の仕事関数で決まる数 eV 程度の揃ったエネル ギーで表面から自発的に陽電子が再放出されま す。この再放出陽電子を、数 eV から数十 keV 程度に加速したエネルギー可変単色陽電子ビー ムのことを「低速陽電子ビーム」と呼びます[1]。

なお、陽電子は物質中で電子と対消滅しますが、 その消滅断面積は他の散乱断面積と比較して約 6桁小さいため、大部分は物質中で対消滅する 前に熱化します。

低速陽電子ビームは、KEK 物質構造科学研 究所の量子ビームの4本柱のうちの1つです。 低速陽電子ビームは、伝統的に陽電子消滅実験 や原子分子物理実験に用いられてきましたが、 近年、陽電子回折が理想的な表面構造解析手法 であることが KEK 物質構造科学研究所の低速 陽電子実験施設において明らかとなってきてい ます。表面構造解析は、スピントロニクスや先 進触媒材料研究における基盤計測技術として注 目されています。スピントロニクスは、電子の スピンと電荷の両方を利用することにより、従 来のデバイスより高速かつ低消費電力で動作す る非揮発性メモリや量子デバイスの基盤技術を 提供するものです。この分野では、表面や2次 元物質が重要な役割を果たし、世界的に研究が 急速に拡大しています。また、低速陽電子実 験施設では、電子と陽電子からなる水素原子 様束縛状態であるポジトロニウム(Ps)のレー ザー冷却が、共同利用によって最近成功しまし た[2]。この成果は、Ps 精密分光への新たな道 を切り開くものであり、束縛系 OED の検証実 験への進展が期待されています。この Ps レー ザー冷却成功の成果は、Institute of Physics (IOP、 英国物理学会) 発行の Physics World 誌によって Top 10 Breakthroughs of the Year in physics for 2024」 に選出されました [3].

本ワークショップでは、全35 講演のうち5 講演が低速陽電子ビーム利用施設からの発表 でした。初日の10月16日には、まずは加速 器分野から、SLACのJohn T. Seeman 氏による Stanford Linear Collider (SLC)における高強度 陽電子源に関する講演が行われました。同氏 は、SLCでの運転の経験を基に、将来の陽電 子電子コライダーに必要とされる改良点や課題 について詳しく議論しました。続いて、CERN の AEgIS Physics Coordinator を務める Benjamin Rienäcker 氏による、低速陽電子ビームを活用 した物質研究の概要紹介が行われました。その 後、3日目最終日に予定されていた低速陽電子 ビーム関連の4講演までは、高強度陽電子源を 含む加速器関連の講演が行われました。

レセプションやコーヒーブレイク、ランチの 時間などに、KEK 加速器研究施設の方々のご 紹介を通じて、多くの研究者と交流する機会 をいただきました。例えば、IJCLabの Robert Chehab 氏とは比較的ゆっくりお話させてい ただくことができました。Chehab 氏は、長年 高強度陽電子源の研究を続けられ、KEK の Tristan 計画で陽電子源の開発を開始した際に は、数ヶ月間にわたり KEK つくばキャンパス に滞在し協力されたとのことでした。当時の日 本滞在に関する思い出や、陽電子源研究に関す る見解を直接伺うことができ、大変貴重な時間 となりました。また、SLAC の John T. Seeman 氏ともお話する機会に恵まれました。Seeman 氏からは、X線自由電子レーザー(XFEL)の物 性研究への応用についての質問をいただき、加 速器技術応用への関心の高さが印象的でした. 私にとって、Seeman 氏の高強度陽電子源に関 する講演およびその後のディスカッションは、 非常に興味深い内容でした。

高強度陽電子は、電子線形加速器(LINAC) などで加速した電子をWなどの重金属標的に 入射することで、電子・陽電子対生成によるカ スケードシャワー(電磁シャワー)によってつ くられます。高エネルギー物理実験では、得ら れた高速陽電子を電磁場で操作した後、直接 GeVオーダーまで加速します。一方、低速陽 電子ビームを生成する場合には、対生成された 高速陽電子を、「モデレータ」と呼ばれる陽電 子仕事関数が負の金属薄膜によってエネルギー を単色化します。高強度陽電生成部分の技術は 両者で共通しており、KEK でもこうした高強 度陽電子源技術が低速陽電子生成に応用されて きました。

高強度陽電子源の実験的研究としては、1990 年代までの SLAC における SLC 計画で達成さ れた 33 GeV、27 kW の加速電子による実験が 貴重な知見を提供しています。この経験から、 10 kW 程度までの加速電子パワーの入射であれ ば、W 固定標的でも損傷することなく使用で きることがわかっており、10 kW 入射は低速陽 電子ビームの将来計画における1つの重要な指 標となっています。

また、SLACで開発が始まり、SuperKEKB の陽電子源でも活躍しているパルス型フラック スコンセントレータ (Pulsed Flux Concentrator, FC)と、その後段の加速管による高強度低速 陽電子生成のアイデアについても議論が行われ ました。例えば SuperKEKB では、対生成され た高速陽電子を FC によってその角度広がりを 小さくし平行性を高めた後に(空間的な「直径」 は広がります)、加速管を用いていったん「減速」 し、その後リニアックで再加速する仕組みが採 用されています。この SuperKEKB の陽電子源 で使われている技術を低速陽電子ビーム生成に 応用し、FC とその後段加速管でいったん「減 速」した陽電子をモデレータに入射すれば、低 速陽電子への変換効率を 50 倍程度向上できる 可能性があります。モデレータに入射した陽電 子のうち、表面から100 nm 程度の深さ領域で 熱化した陽電子が、拡散によって表面に到達し 再放出し得ます。陽電子の侵入深さは入射エネ ルギーに依存するため、減速してからモデレー タに入射をすることで、表面近傍で熱化する陽 電子の割合が高まり、高速陽電子から低速陽電 子への変換効率が大幅に向上します。この技術 の応用が実現すれば、これまでに類を見ない大 強度低速陽電子ビームの生成が可能となりま す。本ワークショップでは、このような高エネ ルギー物理学分野で発展してきた高強度陽電子 源の技術を物性研究へ応用するアイデアについ ても、活発に議論が行われました。

このような加速器技術の応用は、低速陽電子 ビームの利用を含む幅広い分野で、物性物理学 の未来を明く照らすと同時に、ILC などの電子 陽電子コライダー将来計画につながる技術的進 歩にも大きく貢献する可能性を秘めています。 例えば、電子陽電子コライダー将来計画を見据 えた回転標的による高強度陽電子源の試験機の 開発が、現在着々と進められています。しかし、 試験機が完成したとしても、実際にハイパワー の加速電子を照射できる施設が現時点では存在 しません。ハイパワー標的に関する実験的な研 究は、1990年代の SLC 計画を最後に途絶えて おり、当時の貴重な知見を直接継承する機会が 失われつつあります。当時の経験を持つ研究者 の多くが引退しており、その知見を次世代へ伝 えるための時間的猶予は長くありません。

こうした背景の中、加速器分野と物性研究分 野の研究者が協力し、加速器技術と高強度陽電 子源の経験を投入することで、現在の2~3桁 に相当する大強度の低速陽電子ビームを生成す る可能性について議論が始まりました。このよ うな技術が実現すれば、物性研究分野において 重要な進展をもたらすことは間違いありません。 特に、スピントロニクスの鍵となる表面科学や 表面材料開発研究、あるいは先進触媒材料研究 で、画期的な成果が得られる可能性があります。 また、Ps 精密分光実験による束縛系 QED の検 証も大きく前進するでしょう。そして、このよ うな施設により、電子陽電子コライダーの将来 計画に必要とされる高強度陽電子源試験機への ハイパワービーム照射実験も可能となり、高エ ネルギー物理学におけるハイパワー標的の実験 的研究も活性化されることでしょう。

このように、加速器と物性の研究者が協力し あうことで、高エネルギー物理学と物性物理 学の双方に大きな進歩をもたらす可能性があ るという認識が、両分野のシニアおよび若手 研究者の間で共有されつつあるように感じて います。例えば、2023年の7月16日から21 日にフランス・オルレアンで開催された16th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS-16、低速 陽電子ビーム技術と応用に関する国際ワーク ショップ)では、高強度陽電子源に関係する加 速器関係者の参加があり、両分野での議論が進 みました。その議論を受けて、今回のワーク ショップでは、加速器コミュニティから物性研 究者に声がかかり、さらに広範な交流と協力の 議論のきっかけが生まれた経緯があります。こ のような相互作用が継続されることで、両分野 の研究が新たなステージへと進むことが期待さ れます。

低速陽電子ビーム関連の5講演のうちの4講 演は、最終日となる3日目(10月18日)の セッションに予定されていました。しかしなが ら、誠に残念なことに、天候の影響で実地開催 は当日早朝にキャンセルとなりました。その前 日から24時間続いた雨により、会場のあるパ リ・サクレー大学のキャンパス近くを流れるイ ヴェット川の状況が著しく悪化し、大規模な洪 水が午前7時30分頃に発生する可能性が高い と予想されました。これを受け、パリ・サクレー 大学の学長により、谷間に位置するキャンパス を閉鎖する決定が下されました。徹夜で発表準 備を終えた私は、当日の朝、キャンパス最寄り 駅の2~3駅手前でこの決定の知らせを受けま した。このような経験は初めてで、何とも表現 しがたい複雑な心境でした。その後、最終日の セッションは、12月16日にリモート形式で開 催されました。しかし、対面とリモートでは質 が大きく異なることは否めず、やはり対面での 開催が叶わなかったことは非常に残念でした。 今回の経験を通じて、対面形式の重要性を改め て実感しました。特に、予期しない人々やアイ デアとの出会いの機会は、学術的な成長におい てかけがえのないものです。このような偶然の 交流が生まれる環境を提供できる対面会議の価 値を、改めて深く感じました。

ワークショップ期間中、会場のキャンパス内 にある Musée de la Lumière et de la Matière (光と 物質に関する博物館)の見学会が開催されまし た。この博物館では、電子と陽電子の衝突型加 速器 Anneau de Collision d'Orsay (ACO)を中心と した展示が行われています。ACO は、ヨーロッ パで最初に建設された電子・陽電子衝突型加速 器であり、素粒子物理学の発展に大きく貢献し たとのことです。また、フランスにおけるシン クロトロン放射光源の先駆けでもあり、現代 の Synchrotron SOLEIL や European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) などの放射光施設の基 礎を築いた装置でもあります。

Fig. 1 は、世界初の電子・陽電子衝突型加速 器 Anello di Accumulazione (AdA)の1/4スケー ル模型の写真です。この装置により、電子・陽 電子衝突型加速器の実現可能性が実証され、後 の ACO の開発につながったとのことです。説 明看板によると、この AdA は 1963 年当時のフ ランスとイタリアの国際協力の成果であるとの ことです。



Fig. 1 世界初の電子・陽電子衝突型加速器 Anello di Accumulazione (AdA)の1/4スケールの模型。 (Musée de la Lumière et de la Matière)

Fig. 2 は、ACO の実機です。AdA の技術を 基に発展させた装置で、より高エネルギーの衝 突を実現し、科学の進歩に貢献しました。



Fig. 2 Anneau de Collision d'Orsay (ACO) の実機。 ACO は、ヨーロッパ初の電子・陽電子衝突型加速 器として建設され、素粒子物理学およびシンクロト ロン放射光利用研究に大きく貢献した。ACO で得 られた技術は、現代のシンクロトロン放射光施設 (SOLEIL や ESRF など)や大型コライダーの基盤と なった。(Musée de la Lumière et de la Matière)

Fig. 3 は、ACO に設置された放射光取り出し ポート付近の様子です。案内を担当された方に よれば、物性研究者達が ACO にやってきて、 電子や陽電子が磁場により進行方向が曲げられ る際に放出されるシンクロトロン放射光を利用 させて欲しいと言ってきたことで、放射光取り 出しポートが設置されたそうです。ACO は電 子・陽電子の衝突型加速器としてだけでなく、 フランス初のシンクロトロン放射光源としても 重要な役割を果たしました。ACO は、高エネ ルギー物理学と物性物理学の両分野の研究者の 協力による成功例の1つと言えるかもしれませ ん。



Fig. 3 ACO(Anneau de Collision d'Orsay)に設置 された放射光取り出しポート。物性研究者の要請に より設置され、電子や陽電子が磁場によって進行方 向を曲げられる際に放出されるシンクロトロン放射 光が利用可能となった。ACO はフランス初のシン クロトロン放射光源としても重要な役割を果たし た。(Musée de la Lumière et de la Matière)

エクスカーションの訪問先は、パリのオル セー美術館 (Musée d'Orsay) でした。なお、ワー クショップ会場となった IJCLab は、パリ南方 の郊外に位置するオルセーにありますが、美術 館のオルセーとは名前が同じだけで直接の関係 はありません。オルセー美術館は、パリ市内の かつてのオルセー駅を再利用した美術館で、駅 は 1900 年のパリ万国博覧会にあわせて建設さ れたことは有名です。屋根に完全に覆われた駅 舎で、蒸気機関車が主流だった当時、煙や煤で たいへんだったのではないかと思って質問した 所、この駅舎は、蒸気機関車が乗り入れない世 界初の完全電化路線用の駅として設計されたの だそうです。バンケットは、オルセー美術館内 のレストラン Restaurant du Musée d'Orsay で開 催されました。内装はヴェルサイユ宮殿を彷彿 させられるようなきらびやかなものでした。



Fig. 4 ワークショップのバンケット会場と なったオルセー美術館内にあるレストラン 「Restaurant du Musée d'Orsay」。

本ワークショップでは、陽電子源に関するこ れまでの発展の歴史と最新技術の進展を直接学 ぶことができ、非常に有意義な時間となりまし た。さらに、加速器分野な研究者との意見交換 を通じて、今後の物性研究分野との共同研究の 可能性を広げる貴重な機会となりました。加速 器と物性物理の研究分野が連携を深めること で、両分野における飛躍的な進展に期待を持ち ました。主催者によれば、今回開催された高強 度陽電子源のワークショップは、今後も数年お きに開催する予定とのことで、両分野の貴重な 交流の場として、役割を果たしていくのではな いかと感じました。

最後になりますが、本ワークショップへの参 加に際し、高エネルギー加速器科学研究奨励会 から助成を頂けましたことに、心より感謝申し 上げます。

#### 参考文献

- [1] 和田健「低速陽電子ビームの生成と物質研 究への応用」, OHO'23 テキスト.
   http://accwww2.kek.jp/oho/textbook/from2022/
- [2] K. Shu et al., Cooling positronium to ultralow velocities with a chirped laser pulse train, Nature 633, 793 (2024).

[3] Top 10 Breakthroughs of the Year in physics for 2024 revealed, Physics World, 12 Dec 2024. https://physicsworld.com/a/top-10breakthroughs-of-the-year-in-physics-for-2024revealed/

# ERL2024 ワークショップ開催報告

高エネルギー加速器研究機構(KEK) 阪井 寛志 高エネルギー加速器研究機構(KEK) 島田 美帆

#### 1. はじめに

公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨 励会より国際会議助成を受け、エネルギー回 収型ライナック(Energy-Recovery Linac; ERL) に関する国際ワークショップ ERL2024(The 69th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs)を高エネルギー加速器 研究機構(KEK)小林ホールにて、開催した。 本ワークショップについて報告する。

本ワークショップは、ERL の技術的な課題、 将来の応用を議論するために 2005 年から開催 され、隔年で開催されている。今回は、KEK が主催し、KEK 小林ホールを会場として、開 催された。KEK は前回 2011 年に一度、ERL ワー クショップを開催しており、今回で2回目の開 催であるが、当時は Compact ERL (cERL) が まだ建設されていない状態であり、今回すでに 稼働している cERL の見学も踏まえて、開催と なった。欧米や中国からの海外の多くの参加者 も見られた。会議冒頭の全体講演では、KEK 全体について浅井機構長、KEK 加速器につい て小関加速器施設長から紹介があり、その後、 各施設報告も踏まえた、6つのワーキングルー プ(WG)に分かれて、発表と議論が行われた。 今迄は5つのテーマ(ビームダイナミクス、電 子銃、超伝導加速空洞、応用利用、施設報告) のWGに分かれていたが、今回は昨今の加速 器開発で重要なSustainabilityに関する新たな WGを設けてはどうかとの議論があり、新たに SustainabilityをテーマとしたWG6を追加した。 以下詳細について述べていく。詳細の全体のス ケジュールを図1に掲載しておく。

#### 2. 各 WG での発表について

WG1 ではビームダイナミクスについての発 表が行われ、11件の口頭発表があった。一つ には入射部では高輝度のビームを生成するため に非線形なビーム計算が重要となっており、遺 伝的アルゴリズムを用いた発表が多数見られ た。例えば、cERL 入射部オプティクスの設計 に遺伝的アルゴリズムを用いて行っており、そ のビーム実験との比較について報告があった。 また今後の ERL 計画である PERLE や BriXino の入射部の最適化の報告があった。また、昨 今の加速器でも用いられている機械学習(AI) を用いたビームの最適化について発表があり、 AIを用いたビーム最適化およびビームロス最 小化とCW 大電流ビーム周回についての発表 があった (cERL)。他、ERL 特有のビームダイ ナミクスの議論があった。Beam break Up(BBU)

Tu	iesday (Sep.24)	Wednes	day (Sep.25)	Th	ursday (Sep.26)	Fri	day (Sep.27)
8:00-8:30	Shuttle Bus	8:00-8:30	Shuttle Bus	8:00-8:30	Shuttle Bus	8:00-8:30	Shuttle Bus
8:30-9:00	Registration	8:30-9:00	Registration	8:30-8:45	Registration	8:30-9:00	Registration
9:00-10:00	Welcome and introduction	9:00-10:30	WG1	8:45-10:30	WG4	9:00-10:30	WG3
10:00	Photo	10:30-11:00	Coffee Break	10:30-11:00	Coffee Break	10:30-11:00	Coffee Break
10:00-10:30	Coffee Break	11:00-12:40	WG2	11:00-12:30	WG4	11:00-12:00	WG3
					Lunch (IOC meeting)		
10:30-12:20	WG5	12:40-13:40	Lunch	12:30-14:30	+poster session	12:00-13:10	Closeout summaries.
12:20-13:20	Lunch	13:40-15:20	WG2	14:30-15:00	WG4	13:10-14:00	Lunch
13:20-14:30	WG5			15:00-15:20	WG6	14:30	Shuttle Bus from KEK
14:30-15:30	WG6			15:20-16:00	WG3/WG6 joint		
15:30-16:00	Coffee Break			16:00-16:30	Coffee Break		
16:00-18:00	WG1			16:30-17:30	WG3		
				17:40	Shuttle bus from KEK		
	Welcome Reception		Site Tour in KEK				
18:20-20:00	(KEK)	15:45-17:55	(4 shuttle bus)	18:30-20:30	Banquet at Sansuitei		
					Suttle bus from Sansuitei		
				20:40	(tsukuba center 1, KEK 1)		
20:30	Shuttle Bus from KEK	18:00	Shuttle Bus from KEK				

図1: ERL2024 国際会議のスケジュール

によるビーム不安定性の抑制 (PERLE)、さら に ERL ならではの Multi-turn ERL のビームダ イナミクス (CBETA、S-DALINAC) およびビー ム制御の発表もあり、将来の大電流化および Multi-turn ERL について議論を行った。

WG2では、ビーム源についての発表が行わ れた。現有の施設での電子銃開発およびカソー ド開発の8つの口頭発表があった。大電流でか つ高輝度電子銃の生成を目指す ERL では大き く2つの発表に分かれた。一つは超伝導空洞 (SRF)を用いた電子銃であり、それについて、北 京大学、ELBE、BNL、MSU (WG3 で発表) に よる開発状況が発表された。現状では 1mA CW レベルで SRF 電子銃が安定に運転されている 状況であることが分かった。一方、DC 電子銃 による開発も進んでおり、BNL、KEK(cERL) での開発状況について発表があり、BNL では SF6 ガスを使用しない 500kV 以上の耐電圧を もつ Inverted 型碍子の開発が進んでいる。また、 高偏極度と高量子効率を併せ持つ偏極電子銃の ためのカソード開発の発表も行われた。cERL では1mAビーム運転の現状と今後の10mAビー ムへの展望について発表が行われた。

WG3 では、超伝導空洞についての発表が行 われた。WG6との合同セッションもあり、近 年の超伝導空洞の開発状況も含めて、合計12 件の発表が行われた。主に、① ERL に特化し た超伝導空洞およびクライオモジュール設計、 ②大電流ビーム運転に必要な周辺機器の開発、 ③ CW 超伝導空洞を用いた実際のビーム運転 での現状について報告があり、さらに WG3/ WG6の合同セッションでは、④省電力化に向 けた必要な超伝導空洞開発技術について報告が なされた特に④の WG3/WG6 の合同セッショ ンでは空洞の microphonics を抑え、入力パワー の削減を狙うためのフェライトを用いた高速 チューナー開発、さらに Nb に代わる新しい材 料の Nb3Sn 空洞による高性能空洞の性能評価 について報告があった。

WG4 では、ERL を用いた様々な応用展開に ついての発表が合計 10 件あり、前半はコライ ダー利用、後半は光源利用でまとめられていた。 エネルギー回収による e+e- コライダーへの利 用によるさらなるルミノシティー増強への可能 性について発表 (BNL) や、ILC のアップグレー ドへの ERL についても、発表が行われ、その 際の可能性とその問題点について議論が行われ た (KEK)。Electron Ion collider への応用につい て、特に Electron cooler への ERL を用いた設計 と開発について発表が行われた(Jlab、BNL)。 これら高エネルギー原子核への利用への ERL の可能性を語った。また、後半では ERL を用 いた大強度光源開発についての発表があり、昨 今の半導体リソグラフィー光源として、エネル ギー回収による FEL をベースとした EUV-FEL 光源開発について発表があった(KEK)。さら に ERL 試験加速器による THz 光源開発、また レーザーコンプトン光源(ガンマ線源)の発表 が行われた。さらに超伝導空洞を用いた小型大 強度加速器施設の提案も行われた。

WG5 では、世界各地の ERL 施設報告の発表 が行われた。現状の施設報告および将来計画 含めて、合計 8 件の発表が行われた。現在稼 働中の ERL 試験加速器として、cERL (KEK)、 CBETA (Cornell Univ./BNL)、S-DALINAC (TU-Darmstadt)、bERLinPro(HZB)から発表があった。 さらに、現在建設中の加速器として、MESA (Mainz Univ.) からの発表があり、将来計画 として PERLE (IJClab)、ARIEL (TRIUMF)、 BriXino (INFN) から発表が行われた。

WG6は、今回の ERL2024 国際学会で新たに 設けられたが、昨今加速器でも議論されている Sustainability について発表が行われた。WG3 との合同セッションではすでに WG3 のところ で述べたように、超伝導空洞のより省電力化に ついて、発表が2件あった。さらに、エネルギー 回収によるコライダーの省電力化への取り組 み、超伝導空洞に用いる冷凍機の高効率化、電 磁石の永久磁石の活用、さらに高周波源として 用いている半導体アンプのさらに高効率化の発 表がなされ、加速器のさらに省電力化への取り 組みと4件の発表がなされた。 これらの WG での発表の他にポスター発表 も合計 18 件あり、ERL についての活発な議論 がなされた。

#### 3. 会議の運営について

前回に KEK で行われた ERL workshop では cERL の建設はまだ行われておらず、ERL2024 国際会議では cERL 加速器の見学が行われた。 2 日目の9月25日の午後に見学を実施。見学 は各20名ずつ4班にわかれ、cERL だけでな く、Super-KEKB 加速器、PF 加速器、STF 施設 と4つを交互に見学が行われ、現場の担当者に よる詳しい説明が行われた。30分毎で4か所 を回る見学であり、各施設のスタッフおよび、 LOC、ボランティアの方々のサポートのおかげ で、スムーズな施設見学が行われた。

参加者同士が交流を深めるため、一般行事 もいくつか計画した。軽食と飲み物による Welcome Reception を9月24日の初日の晩に実 施。3日目には和食のバンケットを行った。そ れぞれ非常に好評であった。また、企業参加も 合計12社に参加いただき、企業ブースを小林 ホールのホワイエで3日間以上展示をしていた だいた。コーヒーブレイク、お昼休み、またポ スターセッションに企業と参加者による交流も できるように配慮させていただいた。

本運営については、コロナ後の運営という こともあり、KEK で国際学会の運営が一旦途 絶えた中、LOC では運営自体なかなか慣れな い中でのスタートであった。その中で、この1 年前に KEK と QST が主催で WAO2023 国際 会議があるとのことで、LOC のメンバーの一 部が事前に WAO 国際会議に参加させていた だいた。WAO での問題点を共有し、その後、 ERL2024 国際会議での運営をスムーズにでき たのは大きかった。特に、最初、エポカルでの 開催も検討していたが WAO で直前の準備で場 所の予約金が必要であることがわかったため、 費用面や 100 名程度の会議であることを考慮 し、KEK で開催をした方がいいとの判断をす ることができたのは大きかった。今後、KEK で国際会議を行う方々に、このような国際会議 の運営のノウハウなどが組織的に KEK で蓄え られることを期待したいものである。

#### 4.まとめ

今回の参加者は、8 ヶ国から 110 名以上であった。最後に図 2 に全体集合写真を載せておく。 2 年後の ERL workshop はドイツのマインツ大 学で行われることになった。

無事開催が終わったことに、まず関係する 方々に感謝いたします。特に、本国際会議の運 営は LOC の方々およびボランティアの方々に 活動いただいたたことで、成功裏に終わったこ とに感謝を申し上げます。最後に公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会のサポート に感謝を申し上げます。



図2: ERL2024の全体集合写真

# 第4回 J-PARC シンポジウム 2024

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)J-PARC センター 小林 隆 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)J-PARC センター 田村文彦

### 1. はじめに

高エネルギー加速器科学研究奨励会より国際 会議等助成を受け、第4回 J-PARC シンポジウ ム 2024 を開催したので報告する。本シンポジ ウムは、2024 年 10月 14 日から 18 日までの日 程で水戸市民会館にて開催された。

J-PARC では素粒子・原子核から物質・生命 までの多彩な実験を通じ、基礎科学から産業 応用に至るまでの幅広い研究が行われている。 2009 年に J-PARC の全施設が稼働を開始して以 降、加速器のビーム出力は年々向上し、現在で はほぼ設計出力でのユーザー運転が実現されて おり、世界有数の実験施設として多くの成果を 生み出している。15年にわたる J-PARC におけ る研究を総括するとともに、J-PARC のこれか らの展開、そして、世界における今後の実験施 設・加速器施設への J-PARC で生み出された技 術・経験の波及について、専門的かつ網羅的な 議論を行うことを目的とした本シンポジウムの テーマは「J-PARCの将来とJ-PARCが創る未来」 「Futures of J-PARC, Futures by J-PARC」と設定 された。

## 2. 市民公開講座

10月14日はグロービスホールで市民公開講 座「J-PARCが創る未来、探る謎―次世代のエ ネルギーから宇宙まで―」が以下に示すプログ ラムで開催された。

ニュートリノと反物質一宇宙の不思議に迫る 中家剛(京都大学大学院理学研究科教授) 水素社会がやってくる!

今井英人(技術研究組合 FC-Cubic 高度材料



Fig. 1 市民公開講座で講演を行う 中家剛氏(上)、田村裕和氏(下)

解析部 部長/京都大学成長戦略本部 特任 教授)

J-PARC 地上実験で暴く宇宙の物質進化の果て "中性子星"

田村裕和(東北大学大学院 理学研究科 教授)

ミュオン非破壊分析で迫る太陽系の起源と進化 寺田健太郎(大阪大学大学院理学研究科宇宙 地球科学専攻教授)

固体中の磁気渦がつくる新しい粒子とその驚く べき性質

十倉好紀(東京大学卓越教授/国立研究開発

	14-Oct Mon	15-Oct Tue	16-Oct Wed	17-Oct Thu	18-Oct Fri
8:00					
9:00		9:00 - 10:40 Opening	9:00 - 10:20 Plenary Session 3	8:50 - 10:30 Parallel Session 5	9:00 J-PARC Tour
10:00	10:30 - 12:40	Plenary Session 1		PN, MLF, Target	
11:00	Public lectures in Japanese	11:10 - 12:40	10:50 – 12:20 Plenary Session 4	11:00 - 12:40 Parallel Session 6	
12:00		Plenary Session 2 Group Photo		PN, MLF, ADS	
13:00	13-30 - 16-30		13:40 - 15:20		
14:00	Public lectures in Japanese	14:00 - 15:40 Parallel Session 1	Parallel Session 3 PN, MLF, Acc	14:00 - 15:30 Plenary Session 5	
15:00		PN, MLF, Target			
16:00		16:10 - 17:50 Perellal Session 2	15:50 – 17:55 Parallel Session 4	16:00 - 17:40 Plenary Session 6	
17:00	17:30 -	PN, MLF, ADS	Safety	Closing	
18:00	Welcome Reception	18:00 - 20:00 Poster core time	18:30 - 20:30		
19:00		with wine	Banquet		
20:00					

The 4<sup>th</sup> J-PARC Symposium Schedule Summary

Fig.2 全体プログラム

法人理化学研究所 理事長特別補佐) 司会者は、理系のインフルエンサーである五十 嵐美樹氏(サイエンスエンタテイナー/東京都 市大学教育開発機構准教授)にお願いした。

上記の研究者の方々は素粒子・原子核物理 (図1)、そして中性子やミュオンを利用した基 礎科学から産業利用までの幅広い分野における J-PARC を利用した最先端の研究について、272 名の聴衆に向けわかりやすい講演を行った。各 講演後には時間に収まり切れないほどの質問が あり、一般市民の皆さんに J-PARC を知ってい ただく機会となった。

# 3. シンポジウム

10月15日から17日までシンポジウムが開 催された。全体プログラムを図2に示す。参加 登録者は415名、発表登録数は383(うち口頭 発表93)であった。日本からの参加者367名 に対し海外からの参加者は48名と割合は少な めであったものの、15カ国からの参加を得た。 欧米のみならずアジアからの参加者もおり、特 に、ネパール、パキスタンからの複数の参加が あったことは特筆しておきたい。また、年齢層 は20代から80代までと幅広く、特に20歳か ら30歳までの若い大学院生やポスドクの参加 者も多数であった。

シンポジウムは、グロービスホールにおける プレナリーセッション、グロービスホール、ユー ドムホール、大会議室、小ホールを会場とする パラレルセッション、展示室を会場としたポス ターセッションから構成される。口頭発表は、 そのほとんどはプログラム委員の依頼による招 待講演とした。

パラレルセッション(図3)は、MLF(物質 生命科学実験施設)関係のものとして

- Carbon Neutrality, Energy Storage
- Advances in Experimental Techniques and Analytical Methods
- Quantum Devices and Topological Materials



Fig.3 パラレルセッションの模様



Fig.4 ポスターセッションの様子

- Circular Economy and Environmental Sustainability
- Innovations in Life Sciences
- Future plans of neutron and muon facilities

の各テーマで行われ、素粒子・原子核分野では

- Results of the current projects
- Future Projects
- Basic physics with precision measurements
- Neutrino reactions and hadron physics
- Technologies for Future
- Future Facilities and Related Topics

のセッションが開かれた。他には Targetry、 核変換、安全などでパラレルセッションを 行った。加速器単独のセッションとしては、 「High intensity accelerators for spallation neutron Sources」のひとつだけとし、他の加速器の発 表は素粒子原子核、MLF、ADS、Targetry のそ れぞれのセッションに含めることで、より分野 間の交流を深めることを図った。

ポスターセッションでは J-PARC に関連する 全ての分野を網羅する、290 のポスターが集 まった。加速器に関するポスターは約50 であっ た。プログラムの構成上、ポスターセッション が夕刻 (18:00 ~ 20:00) となってしまったため、 ワインやチーズ、軽食を振る舞ったのが非常に 好評であった。図4の写真に示すように、会場 ではワインを片手に活発な議論が行われた。

プレナリーセッション(図 5)も他のセッショ ン同様に、素粒子・原子核物理学から加速器に 至るまで網羅的な発表が行われた。Targetry に 関する発表は、素粒子・原子核物理から加速器 に至るまでの幅広い分野に関連が強いもので、 大強度ビームを扱う本シンポジウム参加者に興 味深いものであった。

プレナリーセッションにおける加速器関係 の発表は以下のふたつである。"CERN LHC Injector Upgrade: experience, achievement and future"と題した CERN の Simone Gilardori 氏に よる発表は、非常に大規模な加速器アップグ レードであった LHC Injector Upgrade (LIU)の 経験と今後の展開について、J-PARC の貢献で ある金属磁性体空胴にも触れながら、簡潔で わかりやすくまとめた発表であった。J-PARC の金正倫計氏の "High-intensity operations of J-PARC accelerators" では、2006年にリニアッ クの調整運転が始まってから 2024年現在に至 るまでの J-PARC 加速器の増強の歩み、そして 今後の更なるビーム増強に向けた開発要素につ いての報告が行なわれた。

最終日プレナリーセッションでの最後の発 表である北野龍一郎氏の "Random thoughts on



Fig.5 プレナリーセッションの模様



Fig.6 バンケットの様子(上)および お茶会(下)の様子

future particle physics experiments at J-PARC"で は、様々な素粒子物理の現状を俯瞰しながら、 計画されている J-PARC の増強を進めるととも に、将来の加速器(氏は仮に「J-PARC++」と 呼んだ)を構想する時期にあるという重要な提 言をした。

シンポジウムでの議論を通じ、本シンポジウ ムのテーマである「Futures of J-PARC, Futures by J-PARC」は(完璧ではないにしても)実践 されたと考えている。

## 4. 企業展示、SOCIAL EVENTS

コーヒーブレイク会場近くには、地元企業から国際的な企業まで15社による企業展示を配置した。特にコーヒーブレイク時には熱心な情報交換が行われる姿が見られ、参加者にも企業にも実りあるものであったと考えられる。

Social events として、10月14日にウェルカ ムレセプション、10月16日にバンケットを開 催した。水戸には450名近くを収容できる会場 があまりなく、バンケット(図6上)は市民会 館の入口ロビーであるやぐら広場を会場とし、 ホテルからのケータリングにより飲食を提供し た。バンケット会場までの移動時間がかからな いことは、参加者に好評であった。出し物とし て、箏奏者 Yoriko さんによる演奏を行った。

パラレルセッションと並行し、石州流水戸何 陋会会長/茨城県茶道連合会会長である湊素仙 先生による、英語ガイド付きのお茶会を開催 し、特に海外からの参加者に好評であった(図 6下)。

## 5. J-PARC ツアー

10月18日には J-PARC ツアーを開催した。 当日は朝から雨であったが、4 班に分かれてリ ニアック、MLF、ハドロン実験施設、ニュー トリノ実験施設(図7)の4 施設の見学を行っ



Fig.7 J-PARC リニアックの見学

た。J-PARC 来訪が始めてという参加者も多く、 非常にためになったとの感想をいただいた。

### 6. おわりに

本シンポジウムが参加者にとって実りあるも のであったことを願う。次回の J-PARC シンポ ジウムの時期は未定であるが、J-PARC の運転 を通じ成果が多数創出されることで、次回シン ポジウム開催の機運が高まるのだと考えられ る。

高エネルギー加速器科学研究奨励会から受け た国際会議等助成により、本シンポジウムの運 営は円滑に進めることができた。ここに改めて 感謝を申し上げます。

#### 参考リンク

- [1] J-PARC2024 Web ページ、 https://j-parc.jp/symposium/j-parc2024/
- [2] J-PARC 市民公開講座ページ、 https://www.j-parc.jp/symposium/j-parc2024/ pub-lecture/
- [3] J-PARC シンポジウム indico プログラム、 https://conference-indico.kek.jp/event/287/ timetable/

# SPring-8/SACLA の現状と展望

理化学研究所 放射光科学研究センター 矢橋 牧名<sup>1</sup>

#### 概要

SPring-8とSACLAは、日本を代表する大型 研究基盤施設として、高輝度の硬X線を提供 しながら科学技術・イノベーションを支えてい る。本稿では、SPring-8とSACLAの概要と最 新の状況を報告する。さらに、SPring-8を第4 世代放射光源にアップグレードする「SPring-8-II」プロジェクトについて概要を紹介する。

#### 1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 と X 線自由電子 レーザー(X-ray free-electron laser: XFEL)施設 SACLA は、日本を代表する大型研究基盤施設 (large-scale research infrastructure)である(Fig. 1)。 多数の産学の利用者に高輝度の硬 X 線を提供 し、ナノレベルの多様な精密解析を通して我が 国の科学技術・イノベーションを支えている。 最近では、低燃費タイヤの開発、光合成のメカ ニズムの解明、燃料電池車の性能向上等、持続 可能な社会実現のための研究開発が精力的に進 められている。

SPring-8 は、第3世代の大型放射光施設と して、1997年に共用を開始した。同じ時期 に整備された第3世代施設として、欧州の ESRF(6 GeV)、米国のAPS(7 GeV)がある が、SPring-8 は8 GeVという最も高い電子エネ ルギーをもち、これを活かして30 keV以上の 高エネルギー硬X線を活用した先端分析が展 開されている。また、サイト選定の際には地盤 の安定性が重視され、その上に構築された加速 器も極めて安定なものとなっている。この結果、 ナノ解析においても高い競争力を有している。 57本のビームラインをもち、利用者数は累計 で30万人を超え、年間発表論文数も1000報以 上にのぼる(日本の自然科学系論文の1%強)。

一方で、SACLA は、米国 LCLS に次ぐ世界 で2番目の硬X線FEL光源として2012年から 共用運転を行っている [1]。熱電子銃をベース とした低エミッタンス入射システムで生成され た電子ビームを、多段のバンチコンプレッサー で圧縮しながら高勾配のCバンド線形加速器 で8 GeV まで加速し、短周期の真空封止アン ジュレータ内で蛇行させる。最後の過程で、光 と高密度電子ビームとの相互作用により光強度 が増幅され、極めて高強度の硬 X 線レーザー が生成される。先行施設は全長 2 km 以上とい うスケールであったが、SACLA は全長 700 m と大幅な小型化に成功し、世界初のコンパクト XFEL 光源として SwissFEL をはじめとする新 施設の整備を促しながら、XFEL 光源の普及に 大きく貢献した。SACLA では、極めて多くの 国際共同研究が実施されており、ハイインパク トな成果が輩出されている。

両施設では、ともに高輝度の硬X線を生 成するが、その時間構造は大きく異なる。 SPring-8 蓄積リングは、2436 個の RF バケット に対して任意に電子ビームを入射することがで きるため、バンチ構造を利用したピコ秒から マイクロ秒領域の時分割解析が可能であるが、 多くの場合は時間的に安定な「擬似 CW 光源」 として利用され、時間分解能は検出器の露光時 間で定まる。一方で、SACLAは、最大 60 Hz のパルス光源であり、シングルパルス内の光 子数は1011以上にのぼる。このような大強度 X線パルスを集光して試料に照射すると、イオ ン化過程を経て試料は最終的に破壊されてしま うが、XFEL のパルス幅は 10 フェムト秒以下 であり、原子が変位する前の試料の状態をプ ローブすることが可能である。このスキームは 「Diffraction before destruction」[2] と呼ばれ、フ レッシュな試料を次々と照射野に導入して回折

<sup>1</sup> yabashi@spring8.or.jp

像を捉える「Serial femtosecond crystallography (SFX)法」をはじめ、多くの XFEL 計測法が この原理に則って行われている。一方で、線形 加速器の下流にビームラインが分岐して作られ るためキャパシティは限られており、現行の ビームラインの本数は硬 X 線 2 本、軟 X 線 1 本の計 3 本、最大でも 5 本となっている。

このように、SPring-8 サイトは相補的な 2 つ の光源を有しているが、加速器技術及び利用技 術(X線光学系・ビームライン、X線検出器、 制御・データ処理等)については、両施設で共 通するものが多数あり、一体として高度化・開 発を進めている。また、オペレーションについ ても一体で行うことにより、効率的で質の高い 運用を目指している。

また、両施設は貴重なデータ創出源としても 重要になってきている。もともと、SACLAは 最大 60 Hz でデータをとり続ける必要があった ため、共用開始時から専用のデータセンターを 整備し活用してきた。一方の SPring-8 も、近年 のビームライン・検出器の性能向上に伴いデー タ生成レートが急増しており、令和3年度の補 正予算でデータセンターが整備された。両施設 ともに、日本でも有数の良質かつ大量のフィジ カルデータの生成源として、富岳等の高性能計 算機インフラとも連携しながら新たな価値を創 出することが期待されている。

本稿では、第2章、第3章でそれぞれの 施設の現状をまとめる。次いで、第4章で は、SPring-8のアップグレードプロジェクト 「SPring-8-II」について述べる。

#### 2. SPring-8の現状

SPring-8 は、年間の運転時間は約 5,200 時間 であり、このうち約 4,400 時間をユーザータ イムに供している。Fig. 2 に近年の運転統計を 示す。2023 年度におけるダウンタイムを除い た利用率は 99.4%、平均障害間隔(Mean Time Between Failure: MTBF)も 400 時間超と、現在 のところ安定運転が実現できている。

しかしながら、最近は機器の老朽化とエネル

ギーコストの急騰という深刻な問題を抱えてい る。特に、最初期に建設された入射器(1GeV 線形加速器 +8GeV ブースターシンクロトロン) は、老朽化が最も進んでいた。これに対処する ために、SACLAの8GeVのCバンド線形加速 器から電子ビームを輸送し、SPring-8 蓄積リン グに入射を行う所謂「SACLA 入射」の整備が 平成 30 年度の補正予算により行われ、2021 年 度から通常の利用運転に供されている(Fig. 1)。 トップアップ運転時には数分間に1パルス程 度の割合で電子ビームが SACLA 加速器から蓄 積リングに入射されるが、この際にも高い安 定性が実現できており、SACLA の利用への影 響も無視できるレベルに留まっている。この SACLA 入射の成功により、既存の入射器の運 用を停止することが可能になった。一方で、蓄 積リング本体については老朽化・エネルギーコ ストの問題が解決しておらず、後述の SPring-8-IIによって抜本的な対策がなされる。

Fig. 3 にビームラインマップを示す。設置可 能なビームライン総数 62 本に対して、57 本が 運用されている。多様なアクティビティが展開 されている一方で、施設全体の最適化がなされ ていなかった。このため、2019年度から、ビー ムラインの再編に着手し、重複機能の整理、性 能の強化、オートメーション化等を実施してき た。特に、定型的な計測(measurement)を高 効率・ハイスループットで行う場を「プロダク ションビームライン」と定義し、ビームライン における計測のみならず、前工程の試料調製や 後工程のデータ処理まで一貫して行うシステム を構築してきた。例えば、粉末 X 線構造解析向 けには、前工程として粉末試料のキャピラリへ の自動充填装置が整備され、1日あたり100本 以上の試料調製を全自動かつ熟練者よりも高品 質で行うことが可能となった(Fig. 4)。後工程 としてのデータ処理としては、1時間あたり最 大1万個の1次元粉末回折データをデータセン ターに自動転送する仕組みが共用されている。 これらをビームラインにおける自動計測と組み 合わせることで、多数の合成試料に対して高速

スクリーニングが可能となった。これを利用して、AI連携に基づく新規化合物の効率的な探索システムの開発も行われている [3]。

また、SPring-8-II に向けて、高エネルギー 硬 X 線ビームラインの拡充も進めている。 BL05XUでは、ワイドバンド幅(Δ *E/E*~0.01) の多層膜分光器が開発され [4]、100 keV のア ンジュレータ放射の強度が従来と比べて 100 倍 以上向上した。これを用いて、高速度イメージ ング、高分解能ラミノグラフィ、極限環境下全 散乱計測、3DXRD[5] 等の先端手法の研究開発 が行われている。

#### 3. SACLA の現状

SACLA では、8GeV の SACLA 加速器の下流 に硬 X 線 XFEL ビームライン 2 本が設置され ている。60 Hz で生成される電子ビームは、加 速器最下流の振り分け電磁石でそれぞれのビー ムラインに振り分けられ [6]、典型的にはそれ ぞれ 30 Hz で利用される。さらに、アンジュレー タホールには、SCSS+ 加速器(850 MeV)が設 置されている。これは、SACLA のプロトタイ プ機(SCSS 試験加速器)を移設・拡充したも ので、この下流に 1 本の軟 X 線 FEL ビームラ インが整備されている [7]。運転時間・利用時 間の統計を Fig. 5 に示す。尚、利用時間につい ては 3 本のビームラインの合計時間を示してい る。利用率は 95% 以上と、XFEL 施設として は非常に高い数字になっている。

硬 X 線領域の FEL の生成にあたっては、 一般に自己増幅自発放射(Self-amplified spontaneous emission: SASE)方式が広く用いら れている [8]。SASE は、「高密度の電子ビーム を長尺のアンジュレータにシングルパスで通し て放射光を増幅させる」というシンプルな原理 に基づいており、光共振器、外部シード光の いずれも不要という特徴がある。SACLA にお いても、SASE は通常の運転に用いられ、7 fs 幅の超短パルス X 線を提供している。一方で、 SASE は電子ビームのランダムな密度揺らぎを 光発生の起源としているため、得られる FEL の 光子エネルギー・時間スペクトルはスパイク構 造をもち、さらにこの構造はパルス毎に異なっ ている。位相の揃ったフーリエ限界光の生成を 目指して、セルフシード方式が提案された [9]。 これは、アンジュレータ列の中間に X 線結晶 分光器を挿入し、一旦スペクトルを狭帯域化 した上で再度増幅させるというものである。 SACLA では、分光器としてマイクロチャンネル カット分光器という小型のデバイスを用いるこ とで、安定なシード運転が実現されている [10] (Fig. 6)。

また、SPring-8/SACLA では、大阪大学と共 同で超精密 X 線ミラーを開発してきた。最近、 SACLA において、超精密ミラーを用いて 9.1 keV の XFEL をスポット径 7 nm に集光するこ とで、ピーク強度 10<sup>22</sup> W/cm<sup>2</sup> という世界最高 強度の X 線ビームの生成に成功した(Fig. 7)。 この X 線を金属 Cr 箔に照射することで、高い 励起状態が生成され、最高強度においては全て の束縛電子が Cr 原子から剥ぎ取られることが わかった [11]。今後も、大強度のナノ X 線ビー ムによって、非線形 X 線光学の研究やシング ルショットホログラフィへの応用等、最先端の サイエンスが開拓されると期待される。

#### 4. SPring-8-II の概要

SPring-8 は、四半世紀以上にわたって安定な 運用を継続してきたが、上述したとおり、蓄積 リング本体について、老朽化とエネルギーコス トの高騰という課題を抱えている。また、近年 の利用の需要の増大に応えられていない。2024 年に実施したアンケートによると、現 SPring-8 の受け入れ可能なキャパシティと比べて、既存 利用者のみで約 19 倍、潜在利用者も含めると 約 42 倍のビームタイム需要があることが明ら かになった。

さらに、諸外国では、2010年代半ばから、 Multibend achromat(MBA)ラティスをベース とした極低エミッタンスの第4世代放射光源の 整備が進んでいる。ESRF、APS は、それぞれ 2020年、2024年に第4世代へのアップグレー ドを完了した [12,13]。また、中国では新施設 HEPS の建設が行われ、2025 年に利用を開始す る予定である [14]。各国にとって、最先端の分析 能力の維持はイノベーション推進のために必要 不可欠と位置づけられている。我が国において も、半導体、グリーントランスフォーメーション (GX)、インフラ等の重要な社会的課題を解決 しながら持続的な成長につなげていくために、 第4世代光源の実現が喫緊の課題とされてきた。

SPring-8 における第4世代化へのアップグ レード「SPring-8-II」計画の議論は、SACLA の共用と並行して行われ、2014年には、 Conceptual Design Report が発行された[15]。そ の後、日本初の軟 X 線向け第4世代光源と して、3 GeV の NanoTerasu の整備が決まり、 SPring-8 の加速器チームが中心的な役割を担 いながら、SPring-8-II で想定される要素技術を ベースに NanoTerasu 加速器の設計・整備が行 われた。NanoTerasu は、当初の計画通り 2023 年度に整備が完了し、2024年度から利用が開 始された[16]。

並行して、SPring-8-II 実現に向けて様々な議 論・取り組みが行われた。加速器設計について は、NanoTerasuの成果を反映しながらブラッ シュアップが重ねられ、最新の内容は、Journal of Synchrotron Radiation 誌上の論文としてまと められた [17]。国の取り組みとしては、2023 年 春の共用法改正に伴う国会の附帯決議を受け、 文科省内で「SPring-8の高度化に関するタスク フォース」が結成され、同年8月に報告書がま とめられた。2024年度には、当初予算として SPring-8-II の加速器プロトタイプ開発費が措置 された。そして、2024年12月には、令和6年 度補正予算により、SPring-8-IIの整備に着手す ることが決定された。整備期間は、2024年度 から 2028 年度までである。この中で、2027 年 度後半から 2028 年度前半の約1年間は加速器 入れ替えのために長期の運転停止を行う。その 後、加速器・ビームラインのコミッショニング を経て、2029年度から SPring-8-II の利用運転 を開始する予定である。

SPring-8-IIの加速器・光源設計にあたっては、 以下のように大目標を定めた。

A:第4世代放射光源として、硬X線領域の輝 度を2桁向上させながら高い安定性を堅持

B: 持続可能な大型研究基盤施設のモデルとし て、サイト全体の消費エネルギーを半減

また、主要な境界条件として、既存の蓄積リン グ棟・加速器トンネルの利用、挿入光源ビーム ライン光軸の保持、約1年間のシャットダウン 期間をおいた上で、加速器・光源設計に関する 以下の基本方針が定められた。

- 電子エネルギーを 8GeV から 6GeV に低減 (A、B)
- ② ラティスを DB から 5BA に更新(A)
- ③ Longitudinal Gradient Bend (LGB)、BQ combined 等の特殊磁石の採用(A)
- ④ アンジュレータの短周期化(A)
- ⑤ 4 箇所の 30m 長直線部の活用(A)
- ⑥ 偏向磁石向け永久磁石の採用(B)
- ⑦ SACLA からのビーム入射(A、B)

これをベースラインとしながら、綿密な検討 が行われ、加速器の詳細設計が完成した [17]。 代表的なパラメータを Table 1 にまとめる。

第4世代光源としての極低エミッタンスを実 現するために、①②③をベースに詳細な検討が 行われた。この結果、挿入光源での放射損失が ないときの値として、現行 (En =2400 pm.rad)の 20分の1以下である ɛn =110 pm.rad が達成され る。加えて、実際の運用時には、挿入光源の放 射損失によりエミッタンスがさらに低減する。 SPring-8-II では、通常のアンジュレータの運用 に加えて、全周に4箇所ある30m長直線部の 一部にダンピングウィグラー(DW)を導入す ることにより、En=50 pm.rad まで小さくするこ とが可能となる(⑤)。極低エミッタンス化に より、硬 X線領域のコヒーレントフラックス が飛躍的に増大するとともに、電子ビームの水 平方向サイズの縮小により、光源形状が線光源 から点光源に近づき(Fig. 8)、軸上スペクトル が大幅に改善される(Fig. 9)。

ノーマルセルのオプティクス・磁石配列を

Fig. 10 に示す。5 ベンドのうち、セル中央の Normal Bend (NB)の磁場(0.95 T)は、現 SPring-8 の偏向電磁石の磁場(0.68 T)より高 く設計されており、これによって6 GeV でも 臨界光子エネルギー 22.8 keV が確保される。 NB からの放射光の光軸は既存の B2 ビームラ インとほぼ一致しているため、多数の偏向磁石 ビームラインで引き続き硬X線の利用が可能で ある。Fig. 11 に示すスペクトルの通り、B2 ラ インにおいて、50 keV 以下では現行よりも高い フラックスが得られることがわかる。一方で、 BL01B1 を除く B1 ラインは 50 keV でフラック スが約1 桁低下する。

アンジュレータとしては、主磁石列の両サイ ドに吸引力相殺のための補助磁石列を配した新 しいコンパクト型真空封止アンジュレータ(In-Vacuum Undulator for SPring-8-II: IVU-II)[18]が 標準デバイスとして使用される。短周期の磁 石列を使用することで、Fig. 12に示すように、 超高輝度の高エネルギー領域の硬 X 線の生成 が可能となる(④)。さらに、30 m 長直線部に 短周期アンジュレータを導入することにより、 蓄積リングとして世界最高クラスの輝度が達成 される(⑤)。

ダイナミックアパーチャーが小さくビーム寿 命が短い第4世代光源においては、トップアッ プ運転時のビーム安定性の確保が大きな課題と なっている。SPring-8-II では、現行の SACLA 入射をさらに洗練させることで、十分な安定性 を確保する目処がついた(⑦)。

最後に、①⑦⑧によって大幅な省エネを達成 する。特に、⑧では、偏向磁石向けに従来の電 磁石ではなく永久磁石を用いることで、電力と ともに冷却系・空調系への負荷も大きく削減す る。従前と比べてサイト全体における消費エネ ルギーの半減が可能となる見通しである(Fig. 13)。

#### 5. おわりに

本稿では、SPring-8 と SACLA の現状に続き、 SPring-8-II の概要について、加速器・光源設計 を中心にまとめた。SPring-8-II の技術的な詳細 については、本稿の範囲を超えるため別の機会 に譲りたいが、磁石・真空コンポーネントを中 心に、従来と比べて格段に小型化・高機能化が 進んでおり、最先端のエンジニアリングの粋を 結集することではじめて具現化の目処がついた ことを強調したい。

SPring-8-II は、単なる放射光施設の性能の高 度化にとどまらず、大型研究基盤施設が将来に わたって社会を支え続けていくためのモデルを つくるという観点からも極めて重要である。整 備と並行して、運用のアップグレードについて も検討を進めていく。

さらに、SACLA の将来構想について本稿で は触れなかったが、国際的には XFEL 施設の新 設やアップグレードが進んでおり、フラッグ シップ施設としての SACLA の魅力をどのよう に維持・発展させるか、しっかりとした検討を 行っていく。

- [1] T. Ishikawa et al., Nature Photon. 6, 540 (2012).
- [2] S. Boutet et al., Science 337, 362 (2012).
- [3] A. Miura et al., J. Am. Chem. Soc. 146, 29637 (2024).
- [4] T. Koyama et al., J. Synchrotron Rad. 31 276 (2024).
- [5] J. Kim et al., J. Appl. Cryst. 56, 1416 (2023).
- [6] T. Hara et al., Phys. Rev. Accel. Beam, 19, 020703 (2016).
- [7] T. Shintake et al., Nature Photon. 2, 555 (2008); S.Owada et al., J. Synchrotron Rad. 25, 282 (2018).
- [8] R. Bonifacio et al., Opt. Commun. 50, 373–377 (1984).
- [9] E.L. Saldin et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 475, 357 (2001).
- [10] I. Inoue et al., Nature Photon. 13, 319 (2019).
- [11] J. Yamada et al., Nature Photon. 18, 685 (2024).
- [12] P. Raimondi et al., Commun. Phys. 6, 82 (2023).
- [13] h t t p s : / / p u b l i c a t i o n s . a n l . g o v / anlpubs/2019/07/153666.pdf
- [14] Y. Jiao, et al., J. Synchrotron Rad. 25, 1611 (2018).

- [15] RIKEN-JASRI SPring-8-II Project Team. SPring-8-II Conceptual Design Report. RIKEN SPring-8 Center, Hyogo, Japan (2014). http://rsc.riken.jp/ pdf/SPring-8-II.pdf
- [16] S. Obara et al., Phys. Rev. Accel. Beam, 28, 020701 (2025).
- [17] H. Tanaka et al., J. Synchrotron Rad. 31, 1420 (2024).
- [18] K. Imamura et al., J. Synchrotron Rad. 31, 1154 (2024).



Fig.1 SPring-8 accelerator complex.



Fig. 2 Operation statistics of SPring-8.



Fig. 3 SPring-8 beamline map.



Fig. 4 Automated capillary inject.



Fig. 5 Operation statistics of SACLA.



Fig. 6 Spectra of self-seeding vs. SASE.



Fig. 7 7-nm focusing mirror system at SACLA.



Fig. 8 Comparison of spatial profile of electron beam.



Fig. 9 Comparison of on-axis undulator spectrum.



Fig. 10 Optics and magnet arrangement for normal cell.



Fig. 11 Photon flux vs. photon energy for bending magnet radiation.



Fig. 12 Brilliance vs. photon energy for undulator radiation.



Fig. 13 Comparison of power consumption.

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	SPring-8	SPring-8-II
Beam energy (GeV)	8	6
Stored current (mA)	100	200
Circumference (m)	1435.95	1435.43
Lattice	Double bend non-ach	5 bend achromat
Damping part. # (J <sub>x</sub> , J <sub>y</sub> , J <sub>s</sub> )	1.0, 1.0, 2.0	<b>1.383,</b> 1.0, 1.617
Emittance (pmrad)	2,400	110 -> 50 (w/ DWs)
(β <sub>x</sub> , β <sub>y</sub> , η <sub>x</sub> ) [m] <b>@ ID</b>	(31.2, 5.0, 0.146)	(8.2, 2.8, 0.0)
σ <sub>Δp/p</sub> [%]	0.109	0.098
Straight section length (m)	6.6	4.8
Typical beam profile at undulator center	$\begin{array}{c} 2 \text{ mm} \\ \hline \\ \hline \\ \sigma_x = 316 \ \mu\text{m} \\ \sigma_y = 5 \ \mu\text{m} \end{array} \right) \begin{array}{c} \blacksquare \\ \bigtriangledown \\ \bigtriangledown \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 2 \text{ mm} \\ \hline \\ - \\ \sigma_x = 30 \ \mu\text{m} \\ \sigma_y = 5 \ \mu\text{m} \end{array} \right) \begin{array}{c} \text{fill} \\ \text{c} \\ \end{array}$

Table 1 Comparison of key parameters.

# 第41回高エネルギー加速器セミナー(OHO'24)開催報告

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 校長 本田 融

1984年に始まった高エネルギー加速器セミ ナー(OHO)は、今回 2024 年で第41 回目の 開催となった。これまでの OHO セミナーでは 主としてある特定の加速器プロジェクトやそれ を支える加速器技術にフォーカスしてきたが、 今年度は少し趣向を変えて「新奇・革新」とい う方向性を基軸として様々な加速技術を紹介す るオムニバス形式とした。現行の加速器よりも 高い周波数での加速を実現するコンパクトな金 属製常電導空洞の製作技術、さらに高い周波数 での加速への応用が期待される誘電体を利用し た加速構造やそのための高周波源、超伝導空洞 の限界性能の向上を目指した積層薄膜技術、ま た加速に必要な周辺技術として高効率なクライ ストロンや大電力源の開発などについて講義が 行われた。また夜話として近年精力的に研究開 発が進められてきたレーザープラズマ加速につ いて新進気鋭の研究者に講義をいただいた。

内容が多岐にわたるオムニバス形式であるこ とを補うため、本年のプログラムでは各講師に よる講義に先立って、本セミナーの企画立案を 主導された阿部哲朗氏によるセミナー全体の概 要やそれぞれの講義テーマの関連性を解説する イントロダクションセションを設けた。そして 全講義終了後に、約1時間という限られた時間 ではあったが、講師全員が各自の講義テーマに 関わる展示を行い、参加者からの質問に応え、 ディスカッションを行う特別質疑応答セッショ ンを対面で実施した。

参加登録者は約140名で、約半数が大学・国 立研究機関関係者、企業の方がほぼ3割、大学 院・学部の学生がほぼ2割といった内訳であっ た。特に企業の方の割合が昨年に比べて倍増し ていることが目立ち、また学生の割合も増加し た。将来の加速器技術を視野に入れた今年度の テーマが企業関係者や若い方の注目を引いたこ とが伺われる。

第3日目の9月12日(木)の午後につくば キャンパス内で施設見学を行った。講義内容に 関連の深いXバンド高電界試験施設(Nextef2)、 超伝導空洞製造設備と積層薄膜実験装置、レー ザー・テラヘルツ試験施設の3か所を見学し、 セミナー講師も見学者への説明を行った。参加 人数は計16名で、2つのグループに分けて見 学を行い担当者への質問やディスカッションに 対応した。

開催後のアンケートでは講師の丁寧な説明や 専門外の方へのわかりやすさを評価する意見を いただいた。一方で一部にあった英語の講義に ついて、不慣れなテーマを英語で理解するのは 難しかったという回答も見受けられた。対面で 参加し、セミナー講師が対応をした施設見学や 特別質疑応答を楽しく感じたというご意見も あった。

開催形式は本年も昨年同様に対面と Zoom 配 信を併用したハイブリッド開催とした。対面で 20 名程度の聴講者があった一方で、Zoom 配信 には常時 40 名から 50 名程度の接続があった。 特に企業関係者はリモート配信のほうが参加し やすいと思われ、またコロナ禍の影響でリモー ト配信をするようになって以来、対面のみで開 催していた当時より参加登録者数の増加も見ら れている。今回は施設見学や特別質疑応答など 対面に限定した内容も一部行ったが、今後もよ り多くの方に参加していただくためにリモート 配信の併用を継続したいと思う。

9月に入っても例年に比べとても気温の高い 状態が続いていたが、開催中は特に遅延やトラ ブルもなく無事に OHO'24 の日程をこなすこと ができた。ここに参加者、講師をはじめ、セミ ナー開催にご尽力いただいた関係者、スタッフ のみなさまにお礼を申し上げます。





参加者内訳



参加者

# 第4回 加速器施設探訪会開催報告

高エネルギー加速器科学研究奨励会では、2021年度から、賛助会員を対象として、加速器施設内 の一般見学ではアクセスできない場所、機器等を担当者の解説を交えてじっくりと「探訪」すること を目的に、「加速器探訪会」を開催しています。第4回目となる今年度は、以下の要領で実施されま した。

- 主 催 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会
- 協 力 青森県量子科学センター、量子科学技術研究開発機構 六カ所フュージョンエネルギー 研究所、公益財団法人 環境科学技術研究所
- 実施日時 2024年10月7日(月)9:00~15:30

(当初、9月2日に実施予定であったが、台風接近のためこの日に延期した)

募集人員 20名(先着順) 参加者は、13社、22名

探訪場所 六カ所村次世代エネルギーパーク

集合場所 ホテルルートイン三沢 玄関前 (借上げバスで QSC へ移動)

#### 見学コース

① 青森県量子科学センター (QSC) 9:00 ~ 9:30

ここではサイクロトロンで発生させた陽子ビームを用いて、PET(陽電子放射断層撮影)、 BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)、NRT(中性子イメージング)、PIXE(粒子線励起 X 線分析)に 関する実験・研究が行なわれています。月曜日はメンテナンス日なので、直接、加速器およびビー ムラインを見学でき、担当者と現場で意見交換することができました。



サイクロトロン



ビームライン

② 量子科学技術研究開発機構 六カ所フュージョンエネルギー研究所 9:35 ~ 12:00

はじめに竹永所長より概要説明をうけた後、スーパーコンピューターおよび加速器制御室(画 面の表示はすべて英語)を見学しました。その後2班に分かれて、加速器(LIPAc)、高周波電源室、 共同研究棟を見学しました。ビームデューティーは目標の100%(CW)に対し、約10%に到達 したとのことで、性能向上が着実に進んでいる様子が伺えました。共同研究棟では、タイミング 良く超伝導加速モジュールの組み立て・アライメントを欧州の技術者が行なっている現場を間近 でみることができました。さらに、核融合炉ブランケットの設計の妥当性を検証するための大面 積熱負荷装置を見学しました。最後に参加者と所長等との意見交換が行なわれましたが、原型炉 (DEMO 炉)実現へ向けての状況等についての質問が出されていました。



スーパーコンピューター



加速器(LIPAc)



超伝導加速空洞のアライメント風景



ブランケット熱負荷試験装置



加速器制御室

③ 六カ所原燃 PR センター(自由見学) 12:15~13:45 ここには、核燃料サイクルに関するアウトリーチのための展示がされており、最上階からは、 風力発電用の風車(数十基)や石油備蓄タンクが遠望できました。(昼食は隣接するレストランで)

④ 環境科学技術研究所 14:00 ~ 15:30

はじめに、本所において、角田理事から研究所の概要説明を受けた後、2班に分かれて、全天 候型人工気象実験施設(この施設の特徴は、霧の発生ができることで、"やませ"を模擬できる とのこと)、生態系実験施設(実験にはトリチウムの代わりに重水素を使用しているとのこと) を見学し、その後、先端分子生物科学研究センターにバスで移動して、低線量放射線が生物に及 ぼす影響の調査の状況について説明を受けました。



小型人工気象チャンバー



全天候型人工気象実験施設



先端分子生物科学研究センター

開催後に行なったアンケートでは、「見学施設、見学時間等プログラムの編成は適切であり、非常 に有意義な見学であった」、「各施設における担当者の説明は、丁寧・的確であった」と回答が寄せられ、 たいへん好評でした.技術的な質問も寄せられましたが、各施設の担当者からの回答をお送りしまし た。また、企業間の交流する場があれば良かったとの声も寄せられました.次回以降の見学希望施設 については、ナノテラス等の加速器施設の他、JT-60、KAGRA等、加速器以外の施設への希望もあ りました。皆様から頂いたアンケート結果をもとに、次回以降の探訪会を企画したいと考えています。

今回の探訪会では、青森県量子科学センターの山崎秀生様、量子科学技術研究開発機構 六カ所 フュージョンエネルギー研究所の竹永秀信所長、環境科学技術研究所の角田英之理事をはじめ、各研 究機関の皆様にはたいへんお世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。

# レクチャー&コンサート「科学と音楽の響宴 2024」

高エネルギー加速器研究機構(KEK)広報室

去る 12 月 1 日 、つくば市のノバホールにおいて「KEK レクチャー&コンサート 科学と音楽の響 宴 2024」(つくば市・つくば文化振興財団共催、高エネルギー加速器科学研究奨励会協賛)を開催し ました。「科学と音楽の響宴」は科学のレクチャーと音楽のコンサートを組み合わせることで脳と心 をバランスよく刺激する刺激するイベントです。15 回目となる今回は約 360 人が集まりました。

イベントの第一部では、KEK の浅井 祥仁(あさい しょうじ)機構長による講演が行われました。「宇 宙のはじまりの『非常識』~唯物論から唯空論へ~」と題し、「唯空論」という宇宙の起源について の新しい視点を紹介しました。ユーモアを交えた語り口に、会場からは時折笑いがこぼれ、難しいテー マでありながらも来場者は興味深く耳を傾けていました。講演後の質疑応答では多くの質問が寄せら れました。

第二部では、ピアニストの川添 亜希(かわぞえ あき)さんによるコンサートが行われました。川 添さんは「天空に馳せる生命のロマン」というテーマで、バッハの「イタリア協奏曲」、フランクの「前 奏曲、コラールとフーガ」、シューベルトの「即興曲」、ベートーヴェンのピアノソナタ「テンペスト」 の4曲を演奏し、卓越した技術と深い表現力で来場者を魅了しました。アンコールではシューマンの 「トロイメライ」が演奏され、その柔らかな旋律により会場に穏やかな時間が流れました。

この度は高エネルギー加速器科学研究奨励会の ご助成により、ポスター印刷等、開催に要する費 用を捻出することができました。また、通常の KEK の予算だけでは実現が困難なプロの演奏家 をお招きし、質の高い企画を開催することができ ました。来場者からも好評のお声をいただいてお ります。厚く御礼を申し上げます。



美しい演奏を披露する川添さん



素粒子の種類について説明する浅井機構長



浅井機構長から川添さんに花束が贈られました

# 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 奨励賞(西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞)受賞者 (2024 年度)

2024 年度の奨励賞(西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞)は、2024 年 12 月 11 日に開催された選考 委員会および 2 月 6 日に開催された理事会において審議の結果、受賞者は下記のとおり決定いたしま した。

なお、受賞者に対する奨励賞授与式は、3月5日(水) 東京・アルカディア市ヶ谷(私学会館) において行われました。

## 西川賞

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等
 全 炳俊

京都大学エネルギー理工学研究所 准教授 2) 研究課題/業績名:先端利用研究のための中赤外

自由電子レーザーの開発

3) 受賞理由

全炳俊氏は、京都大学エネルギー理工学研究所の 中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)施設において、 2008 年の最初の発振から現在に至るまで一貫して、

西川賞受賞者の全氏

自由電子レーザー(FEL)装置の性能向上と利用研究の展開に従事してきた。全氏は、RF 電子 銃空洞の離調によるビーム負荷の動的補償、熱陰極である LaB<sub>6</sub>の光陰極運転、電子バンチ繰り 返しの変調による光共振器の完全同期長発振など、独創性の高い技術開発を積み上げることで、 共振器型 FEL におけるエネルギー引き出し効率の記録更新、3.7 サイクルの超短パルス生成といっ た顕著な FEL 性能を実現した。これらの成果は FEL の基礎研究として高く評価されるとともに、 X線領域を目指す高次高調波発生の入射光としての応用の基盤技術としても注目されている。加 えて、全氏は、加速器の立ち上げから FEL 光の供給までを一人で行うことができる運転システ ムを完成し、これにより、KU-FEL は年間を通じてユーザー実験が可能な施設となった。中赤外 波長域は、分子の指紋領域と呼ばれ光による分子固有振動の共鳴的励起を生じさせることができ るなど、多くの魅力的かつ重要な利用研究が潜在的に存在する。固体レーザーでは、波長変換に よる中赤外パルス生成技術が急速に進展しているが、KU-FEL はマクロパルスでキロワット、ミ クロパルスで 200 メガワットを超える出力を有し、ユーザーの要求に応じて波長を自在に選べる 点において優位性がある。大学保有の装置である KU-FEL は、国家レベルで施設の整備運用がな されている X 線自由電子レーザー装置に比べ人的・予算的にはるかに小規模であるが、多くの 独創的な工夫を加えることで、競争力のある魅力的な光源となり得ることを、全氏は示してきた。 以上の研究業績は西川賞にふさわしいものであると判断された。



## 西川賞



- 1) 受賞者氏名および所属機関・職名等 冨澤 正人 高エネルギー加速器研究機構 特別教授・ 名誉教授
- 2) 研究課題/業績名:J-PARC 主リングにおける遅 い取り出し運転の性能向上についての研究
- 3) 受賞理由

本推薦は、富澤氏による「J-PARC 主リングにお



西川賞受賞者の冨澤氏

ける遅い取り出し運転の性能向上についての研究」に関するものである。富澤氏は、J-PARC MR の遅い取り出しの責任者として、詳細なビーム力学研究に基づくイオン光学設計、ハードウェア R&D、実機建設、実用運転を担い、99.6%という世界最高性能の取り出し効率を実現した。遅い 取り出しにおいては、ビームロス率が取り出し可能なビーム強度を規定する。富澤氏は独自で 考案した dynamic bump スキームを導入し、またデバンチ時に生じるビーム不安定性の抑制など、 高度なビーム制御技術を駆使して低ビームロス・ハイパワー運転(81kW)を確立した。これら の点は、独創性に優れているとともに世界的にも高く評価されている技術である。また、富澤氏は、 J-PARC ハドロン実験施設への取り出しビームスピルの安定性、時間構造の一様性など実験成果 に直結するビーム質の点でも高いレベルでビーム供給を実現している。さらに、J-PARC COMET 実験(μ→ e 探索実験)における大変困難なユーザからの要求(空バンチのビーム含有率 1 × 10<sup>-10</sup>)に応えるなど、高度なビーム取り出し技術により様々な実験に貢献している。以上のこと から、本選考委員会は、西川賞に十分ふさわしい研究であると判断した。

### 小柴賞

- 1) 受賞者氏名および所属機関・職名等
   関谷 洋之
   東京大学宇宙線研究所 准教授
- 研究課題 / 業績名:スーパーカミオカンデにおける超新星ニュートリノ観測技術の開拓
- 3) 受賞理由

超新星爆発では最初にニュートリノが放出される ため、これを検出して超新星の方向を短時間で正確 に決定できれば、可視光や X 線などのフォローアッ



小柴賞受賞者の関谷氏

プ観測が可能となり、マルチメッセンジャー天文学に大きく寄与する。一方宇宙には、過去の超 新星爆発で生成されたニュートリノが数多く存在する。もしこの背景ニュートリノを測定するこ とができれば、超新星爆発の歴史、ひいては宇宙の元素合成の歴史を探ることができる。

関谷洋之氏は、スーパーカミオカンデのタンク水にガドリニウムを導入し、反ニュートリノの 同定効率を大きく向上させることに成功した。これによって超新星ニュートリノの方向を1分半 以内に約3度の精度で発信可能とした。また超新星背景ニュートリノ観測においてもバックグラ ウンドとなる太陽ニュートリノを抑え、その兆候を観測することができた。 これらは国際コラボレーションによる成果であるが、水純化システムの責任者である関谷氏は、 ガドリニウムを保持したまま水の透明度を保つ樹脂や、放射性不純物の少ない硫酸ガドリニウム の製造技術など、難しい技術開発を中心となって主導して実現したものである。

以上の理由により、小柴賞にふさわしい研究であると判断された。

# 小柴賞

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

岡田	信二	中部大学 教授
山田	真也	立教大学 准教授
橋本	直	理化学研究所理研 ECL
		研究チームリーダー
奥村	拓馬	東京都立大学 准教授

 研究課題/業績名:極低温検出器を用いたエキゾ チック原子X線精密分光の開拓



小柴賞受賞者の岡田氏、山田氏、橋本氏、奥村氏

3) 受賞理由

TES(Transition Edge Sensor; 超伝導転移端センサー)は、超伝導相転移近傍の電気抵抗値が著 しく変化することを利用した非常に高感度な熱量センサー(マイクロカロリメータ)である。候 補者は、TES を世界に先駆けて 陽子加速器施設の基礎物理実験に導入しエキゾチック原子の X 線精密分光で革新的な成果を挙げた。

TES は極めて高いエネルギー分解能を備える一方で、外乱に非常に敏感であり、極低温環境下 での高度なノイズ管理が不可欠である。特に、多くの粒子が飛び交う加速器ビームラインで安定 的に動作させることは困難とされてきた。しかし、候補者等が率いる研究チームは独自の技術的 工夫により、TES の性能を最大限に引き出す手法を確立し、ビームラインでの安定運用を実現し た。この結果、従来の半導体検出器と比べ一桁以上高い分解能を持つ TES を用い、π中間子、K 中間子、ミュオンを含むエキゾチック原子の精密測定に成功した。TES による画期的な高精度 X 線測定を次々と実現し、その有用性が国際的に認められた。

また、米国 NIST を含む国際コラボ レーションを主導し、異分野の研究者と密接に連携した。 TES を用いた先進的な X 線分光技術は、原子核ハドロン物理や原子分子物理、ミュオン科学の 発展に大きく貢献しており、候補者等の独創性とリーダーシップは加速器科学の進展に極めて重 要である。候補者は、その先進的な技術力と学際的な協力体制を推進する力により、加速器科学 の未来に貢献している。

岡田氏、山田氏、橋本氏は、2012年のプロジェクト黎明期より測定器技術の開発と加速器ビー ムラインでの実験基盤を構築し、プロジェクトを牽引してきた。奥村氏は 2019年からミュオン を用いた実験の展開に加わり、その進展において重要な役割を果たした。

以上の理由により、岡田氏、山田氏、橋本氏、奥村氏の業績は小柴賞にふさわしい研究である と判断された。

## 小柴賞

(西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞) 授与式

1) 受賞者氏名および所属機関・職名等

春山 富義 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇 宙研究機構 特任教授・副機構長

2) 研究課題 / 業績名:大規模液体キセノン粒子検出 実験を可能としたパルス管冷凍機の開発



小柴賞受賞者の春山氏

3) 受賞理由

液体キセノンは高密度・高感度の優れた粒子検出

媒体として、暗黒物質探索や未知の粒子探索など、素粒子物理学の最先端研究に不可欠な存在で ある。しかし、165Kという低温での液化が必要であり、特に多数の光電子増倍管を直接液体キ セノン中に配置する大規模実験においては、温度安定性と低振動性の両立が極めて重要な技術的 課題であった。

春山富義氏は、この課題を解決するため、同軸型設計と内部再生器方式を採用し、スリット型 熱交換器を具備した革新的なパルス管冷凍機を開発した。本システムは 200W という大きな冷却 能力を持ちながら、±0.1K という極めて高精度な温度制御を実現し、さらに低振動という特長 を併せ持つ。特筆すべきは、このシステムが MEG 実験において 900L もの液体キセノンと 830 本の光電子増倍管を安定的に動作させることに成功し、40 日以上の連続運転を達成したことで ある。

さらに、本技術は KEK から Iwatani 社への技術移転により商用化され、MEG 実験(スイス)、 XENON 実験(イタリア)、PandaX 実験(中国)など、世界の主要な素粒子物理実験施設で採用 されている。これにより、従来は技術的制約により困難であった大規模な液体キセノン検出器の 実用化が可能となり、素粒子物理学の新しい地平を切り開くことに貢献している。

本研究開発は、基礎科学研究に必要な極限環境を実現する技術として極めて高く評価できる。 また、技術移転による産業化の成功は、基礎科学と産業界の橋渡しとしても特筆すべき成果であ る。

以上の理由により、小柴賞にふさわしい業績であると判断された。

### 熊谷賞

1) 受賞者氏名および所属機関・職名
 古矢 勝彦
 元ニチコン株式会社 執行役員 NECST

事業本部 技師長

- 2) 研究課題/業績名:加速器用電源の開発及び製造
- 3) 受賞理由

古矢氏は TRISTAN、SPring-8 及び J-PARC 等の日本の大型加速器の建設において、必須となる電源の設計/製造に関わったのみならず、その後の安定し



小柴賞受賞者の古矢勝彦氏

た運転にも多大な貢献をされてこられた。TRISTAN でのクライストロン電源は、同氏の初期

の業績として挙げられるが、同電源を安定に稼働させるまでご尽力され、同電源はその後の KEKB/SuperKEKB 加速器においても使用され、現在も稼働中である。また、その後に建設され た加速器においても、新しい方式の電源の開発に従事されて、要求以上の性能を達成された。同 氏の関わった代表的な開発製造は以下のとおりである。

1) KEK トリスタンークライストロン電源;クローバ盤、アノード/ヒータ電源、収束電源

- 2) KEKB 用、高精度マグネット電源
- 3) SPring-8 高性度直流電源/クライストロン電源(KEK の発展形)
- 4) J-PARC クライストロン電源;コンデンサーバンク、クローバ盤
- 5) J-PARC 3GeV シンクロトロンの入射用水平シフトバンプ電源
- 6) SACLA クライストロン電源
- 7) 放射線医学総合研究所スキャニング電磁石電源
- 8) SACLA 振り分けキッカー電磁石電源

これらの開発を通し、同氏の経験/ノウハウが継承され続けてきたことには大きな意義がある。 高性能かつ高信頼性のある電源は、加速器がその性能を安定に発揮するための重要な基幹的シス テムであるが、そのシステム構築に長年取り組んでこられ、加速器科学の発展に多大な貢献をさ れた古矢氏の貢献は、極めて顕著であると認められるので、熊谷賞に相応しいと判断された。



2025.3.5 公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞・小柴賞・熊谷賞授与式 於 アルカディア市ヶ谷



# 2025年度 事業計画書

自 2025年 4月 1日

#### 至 2026年 3月31日

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会は、高エネルギー加速器科学及び関連技術の研 究を助成し、加速器科学の振興を図り、もつて我が国と海外との学術研究の推進を図ることを目的と して次の事業を行う。

#### 1. 助成事業

本財団は、高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国内及び国外の 研究者(大学院生を含む。)及び技術者(以下「研究者等」という。)に対する研究助成等を行う。 (1)助成の対象

- ・加速器の原理、物理、技術に関する研究
- ・加速器を用いる研究のための測定技術や装置の開発研究
- ・高エネルギー加速器を用いる研究(但し共同利用実験等は除く)
- ・我国の加速器科学振興のために必要と認められる研究・人材育成
- (2) 助成の内容
  - 1) 研究に対する助成

高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、国内・国外の研究者等に対する国内旅 費等を助成する。

- 2) 国際交流に対する助成

   ①高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、国内の研究者等を海外に派遣する際にこれを助成する。
   ②高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、海外の研究者等を招聘する際にこれを助成する。
- 3) 国際会議・国際研究集会等に対する助成 国内において開催される高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関する国際会議・国際研究集会等で、高エネルギー加速器科学研究機関が主催する場合に必要となる国内旅費等及び会場費等の費用を助成する。
- (3) 助成件数

上記の1)研究に対する助成、2)国際交流に対する助成、3)国際会議等に対する助成のいずれも年間5件程度とする。

ただし、それぞれの助成件数、助成額は助成全体の中で調整することがある。

(4) 選定方法

上記のいずれの助成も選考委員会において申請書の審査を行い決定する。

(5)報告の義務

助成を受けた者は、研究成果報告書他を提出すること。

(6)募集期間

2025年4月~2026年1月末日 ただし、予算の状況により助成できない場合がある。

#### 2. 研修会等の開催事業

- (1) 高エネルギー加速器セミナー(OHO'25)の開催 (高エネルギー加速器研究機構との共催)
  - ・開催テーマ:未定
  - ・開催日(予定): 2025年9月上旬
  - ・会場(予定):高エネルギー加速器研究機構 3号館セミナーホール
     対面およびオンラインによるリモート方式
  - ・参加費(予定):無料
  - ・テキスト代:賛助会員企業所属者(2名まで)・大学生・大学院生…無料 その他 2,000円
  - ・募集人員(予定):対面 100名程度
  - ·募集期間(予定):2025年6月末日~9月上旬
- (2) 加速器施設探訪会の実施
  - ・対 象 者:賛助会員
  - ・開催日(予定):2025年8月~9月頃
  - ・会場:高エネルギー加速器研究機構又は国内の加速器施設
  - ・参 加 費:無料
  - ・募集人員(予定):20名
  - ・募集期間(予定):2025年8月
- (3) 高エネルギー加速器科学インターンシップへの助成

高エネルギー加速器研究機構は、大学の3・4年生及び大学院修士課程の学生(以下大学生等」 という。)を対象とした「加速器インターンシップ制度」を実施し、加速器の開発や運転業務に 一定期間受け入れることで、現場の研究体験を提供している。

奨励会はこの大学生等を受け入れるための財政支援を行う。

- ・開催時期:2025年度下半期
- ・会 場 (予定): KEK つくばキャンパスまたは東海キャンパス
- (4) レクチャー&コンサート「科学と音楽の饗宴」への助成

本事業は、地域の文化活動の一環として、つくば市、高エネルギー加速器研究機構が共催する 科学者と音楽家がコラボレーションする企画として平成17年より毎年開催されてきた。

2020 年度以降コロナ禍のため中止されてきたが、2023 年度に再開された。2025 年度も開催予 定であり、奨励会としては事業として財政的支援を計画する。

- ・開催テーマ及び開催時期:開催テーマは未定、時期は2025年12月(予定)
- ・会 場 (予定):つくば市ノバホール
- ・参 加 費:無料
- ·来 場 者 数:約800人

#### 3. 研究者及び研究グループに対する顕彰事業

- (1) 奨励賞の名称・概要
  - 西川賞 高エネルギー加速器に関する実験的あるいは理論的な基礎研究ならびに応用研究 において、独創性に優れ国際的にも評価の高い業績をあげた、単数または複数の研究者及び 技術者
  - ② 小柴賞 素粒子分野などの基礎科学における測定器技術の開発研究において、独創性に優れ、国際的にも評価の高い業績を上げた単数または複数の研究者及び技術者
  - ③ 諏訪賞 高エネルギー加速器科学の発展上、長期にわたる貢献など特に顕著な業績があったと認められる単数または複数の研究者及び技術者並びに研究グループ
  - ④ 熊谷賞 開発研究、施設建設など長年の活動を通して、加速器や加速器装置への顕著な貢 献が認められる企業の単数または複数の加速器関係者
- (2) 奨励賞の内容
  - 各賞ごとに表彰盾と賞金 30 万円を授与する。
- (3) 表彰件数………各賞合わせて5件程度
- (4) 選定方法

選考委員会において各賞受賞対象の審査を行い、理事会において決定する。

(5)募集期間

2025年9月~2025年11月末

#### 4. 加速器科学に関する知識の普及・啓発事業

一般社会に対し、高エネルギー加速器科学に関する知識の普及・啓発活動を行う。 (KEK 一般公開・奨励会ホームページ・奨励会情報誌(FAS だより)等による)

#### 5. 出版物の編集及び刊行事業

高エネルギー加速器科学及び関連技術の研究成果を加速器科学の振興のため、我が国の研究推進を図ることを目的として出版物を発行する。

- ① FAS だより(奨励会情報誌) ……………………………………………………… 賛助会員等に配布 年 2 回発行
- ②高エネルギー加速器セミナーテキスト ………………………… 賛助会員等に配布 年1回発行
- ③ HIGH · ENERGY · NEWS ………………………………………… 賛助会員等に配布 年4回発行
- 6. その他、この法人の目的を達成するために必要な事業を行う。

# 2025 年度 収支予算書

# 自2025年4月1日 至2026年3月31日

				(単位:円
科	目	2025 度予算 (A)	2024 度予算 (B)	增 減 (C = A - B)
<ol> <li>経常増減の部</li> </ol>				
(1) 経常収益				
(1) 経常収益				
基本財産運用益	基本財産受取利息	3,250,000	3,624,000	△ 374,000
特定財産運用益	特定財産受取利息	0	0	0
受取会費	賛助会員受取会費	5,500,000	4,350,000	1,150,000
事業収益	講習会等事業益	76,000	78,000	△ 2,000
受取寄附金	寄附金等	0	0	0
	預金受取利息	1,000	0	1,000
経常収益計		8,827,000	8,052,000	775,000
(2) 経常費用				,
①事業費	研究助成費	500,000	500.000	(
	国際交流助成費	500.000	500.000	(
	国際会議助成費	500,000	500.000	(
	諸習会等開催費	967,000	918.000	49.000
	·····································	2 000 000	1 800 000	200.000
	出版物頒布費	600,000	549,000	51.000
	給料手当	1 600 000	1 484 000	116.000
	旅費交通費	87,000	97.000	∩ 10,000
	通信運搬費	158,000	97,000	59.000
	一世世國員	0	99,000	59,000
	当新日朝	04,000	84.000	10.000
	6世纪	94,000	74,000	10,000
	具旧/计 	42,000	21,000	11,00
	加弗	42,000	31,000	2.00
<b>古</b> 世 弗 스 斗	林山具	7 174 000	33,000	2,00
中未貝口司		/,1/4,000	0,071,000	503,000
②百珪貝	<u>终</u> 始手业	1 (00,000	1 484 000	11/ 00/
	和科士 3 故勇六 通弗	1,600,000	1,484,000	
	派員文通員	223,000	261,000	<u>∠</u> 38,00
	云祇貝	40,000	35,000	5,00
	通信理撤貨 4.88件日弗	97,000	/6,000	21,00
	11 岙佣前貫	0	0	51.00
	月末品貨	84,000	33,000	51,00
	資借料	89,000	74,000	15,00
	11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本	55,000	55,000	(
	尤熟水料貿 ###	42,000	31,000	11,000
	維貧	32,000	32,000	(
管理貸合計		2,262,000	2,081,000	181,000
経常質用計		9,436,000	8,752,000	684,00
当期経常増減額		△ 609,000	△ 700,000	91,000
経常外増減の部		0	0	(
(1) 経常外収益		0	0	(
有価証券売却益	有価証券売却益	0	0	
基本財産評価益	基本公社債評価益	0	0	
特定資産評価益	特定公社債評価益	0	0	
経常外収益計		0	0	(
(2) 経常外費用		0	0	
有価証券売却損	有価証券売却損	0	0	
基本財産評価損	基本公社債評価損	0	0	
特定資産評価損	特定公社債評価損	0	0	
経常外費用計		0	0	
当期経常外増減額		0	0	
当期一般正味財産増減	額	△ 609,000	riangle 700,000	91,000
一般正味財産期首残高	1	104,563,226	105,263,226	△ 700,000
一般正味財産期末残高	- 1	103,954,226	104,563,226	riangle 609,000
Ⅱ正味財産期末残高		103,954,226	104,563,226	riangle 609,000

※当期経常増減額 △ 609,000 円については、特定資産で補填する。

# (公財) 高エネルギー加速器科学研究奨励会賛助会員一覧

2025年1月1日現在

	会員名		会員名
1	英和株式会社	34	ニチコン草津株式会社
2	S.P. エンジニアリング株式会社	35	日新パルス電子株式会社
3	株式会社大阪真空機器製作所	36	株式会社日本アクシス
4	キヤノン電子管デバイス株式会社	37	日本高周波株式会社
5	金属技研株式会社	38	日本製鉄株式会社
6	工藤電機株式会社	39	日本電磁工業株式会社
7	株式会社ケーバック	40	株式会社野村鍍金
8	小池酸素工業 株式会社	41	浜松ホトニクス株式会社
9	神津精機株式会社	42	ハヤシレピック株式会社
10	コミヤマエレクトロン株式会社	43	株式会社パルスパワー技術研究所
11	秀和電気株式会社	44	株式会社日立製作所
12	JFE テクノリサーチ株式会社	45	株式会社日立テクノロジーアンドサービス
13	株式会社ジェック東理社	46	株式会社 Bee Beans Technologies
14	真空光学株式会社	47	株式会社富士サービス
15	スカンジノバ・システムズ株式会社	48	富士通株式会社
16	住友重機械工業株式会社	49	VAT 株式会社
17	セイコー・イージーアンドジー株式会社	50	武州ガス株式会社
18	大陽日酸株式会社	51	株式会社双葉工業
19	株式会社多摩川電子	52	古本機工株式会社
20	株式会社千代田テクノル	53	ブルーフォース株式会社
21	ツジ電子株式会社	54	株式会社プロテリアル
22	T & M コーポレーション株式会社	55	株式会社マイテック
23	TDK ラムダ株式会社	56	株式会社前川製作所
24	株式会社電研精機研究所	57	松枝印刷株式会社
25	東京ニュークリア・サービス株式会社	58	三菱重工機械システム株式会社
26	東康建設工業株式会社	59	三菱電機株式会社
27	東芝エネルギーシステムズ株式会社	60	三菱電機システムサービス株式会社
28	東洋プラント工業株式会社	61	三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズ株式会社
29	株式会社トヤマ	62	(株) ミラプロ
30	長瀬ランダウア株式会社	63	ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ(株)
31	株式会社NAT	64	明昌機工株式会社
32	仁木工芸株式会社	65	森松工業株式会社
33	ニチコン株式会社		(五十音順)

# 高エネルギー加速器科学





発行 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内(職員会館 2 階)

> TEL · FAX : 029-879-0471 E-mail : info@heas.jp URL : https://www.heas.jp