

1

阪大産研量子ビーム科学研究施設の 研究活動紹介

(大阪大学産業科学研究所 量子ビーム科学研究施設)

大阪大学産業科学研究所
施設長 教授 細貝 知直

阪大産研量子ビーム研究施設はLバンド電子ライナック、テラヘルツ自由電子レーザー、SバンドRF電子銃ライナック、Sバンド150MeV電子ライナック、コバルト60ガンマ線照射装置を有している。これらは大学内に加え海外を含む学外の多数の研究者にも利用されている。講演では、施設におけるこれら装置利用状況とその研究活動、近年JST未来社会創造事業のもとで推進している新奇加速器開発「レーザー加速研究」について紹介する。

阪大産研量子ビーム科学研究施設の研究活動紹介

大阪大学産業科学研究所 量子ビーム物理分野 / 量子ビーム科学研究施設 細貝知直

1. はじめに

阪大産研量子ビーム科学研究施設の主要装置は 3 台の電子ライナックとコバルト 60 ガンマ線照射装置であり、学内外の共同利用・共同研究に提供している[1]。これらを用いてこれまで量子ビーム誘起化学反応初期過程の研究、特に、短パルス電子ビームとフラッシュランプやレーザーを用いたピコ秒・フェムト秒パルスラジオリシス法による高速現象の解明とその物質・材料科学への応用に関する研究に貢献してきた。2010 年からは、ネットワーク型物質・デバイス領域共同研究拠点の制度により全国の大学や公的研究機関と企業にも利用されている。また、2019 年からは JST 未来社会創造事業（大規模型）「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」[2]に参画し、レーザープラズマ電子加速研究を理研播磨（SPRING-8）キャンパスで展開している。本稿では上記主要装置、施設の共同利用の状況、理研播磨キャンパスで展開しているレーザープラズマ電子加速研究について紹介する。

2. 主要装置

当該施設の主要装置は L バンド電子ライナック、フォトカソード RF 電子銃 S バンドライナック、150 MeV 電子ライナック及びコバルト 60 ガンマ線照射装置である。各電子ライナックを用いて発生する電子ビームの仕様を表 1 に示す。

加速器	L バンドライナック				フォトカソード RF 電子銃付ライナック	150 MeV S バンドライナック
	過渡	定常	単バンチ	多バンチ	単バンチ	定常
電子エネルギー (MeV)	18~30	18~30	18~30	12.5~20	40	150
最大ピーク電流 電荷量	15 A	600 mA	30 nC/Bunch	2 nC/Bunch	3 nC/Bunch	0.8 A
パルス幅	5 ns, 8 ns	0.1~2.0 μ s	20 ps	0.1~6.0 μ s		2 μ s
繰り返し	60 以下	60 以下	60 以下	10 以下	10	30
エネルギー幅 ($\Delta E/E$)	~2 %	~2 %	~1 %	~2 %		~5 %
ビーム径	3~5 mm	3~5 mm	3 mm	3~5 mm		5~10 mm

表 1 各ライナックからの電子ビームの仕様

2-1. L バンド電子ライナック

L バンド電子ライナックの電子ビームは、1978 年に設置されて以降、パルスラジオリシス法によるナノ秒からサブピコ秒に至る時間領域の放射線誘起化学反応の過渡特性の解明のために主として利用されてきた。最近では時間分解ラマン分光システムが開発され新たな研究分野も生まれている。一方、1980 年代中盤からは L バンド電子ライナックの電子ビームをド

ライバーとした自由電子レーザーの開発も行われ、現在は THz 領域の自由電子レーザーの安定発振やコヒーレント THz 光の利用研究などが行われている。現在当ライナックには表 1 に示すように 4 つの運転モードがあり、用途に合わせた電子ビームを供給している。パルスラジオリシス法で使用される電子ビームのパルス幅はナノ秒から 20 ピコ秒であるが、更に磁気パルス圧縮を加えることにより 1 ピコ秒以下の電子線パルスの発生も可能である。また、SHB システムの増強や、電子銃の改造により、世界でもトップクラスの最大電荷量 91nC に達する大強度単バンチ電子ビームを発生することも可能である。THz 領域の自由電子レーザー発生においては多バンチビームモードが使用されている。

しかしながら、稼働を開始してからの約 40 年が経過し、その間に数回の大規模改修が行われ、～10 年前の大規模改修では主要マイクロ波電源の安定化、加速管用循環水の精密制御化、PC による運転・制御システムの導入等が図られたものの、加速器の基本的な構成要素は 40 年以上前の製作物であるため老朽化への対応が喫緊の課題となっている。

2-2. RF 電子銃 S バンド電子ライナック

電子銃にフォトカソードを用いて、低エミッタンスかつ超短パルスの電子ビームを発生する S バンド電子ライナックであり、2003 年度に導入された。1.6 セルの S-バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃、2m 進行波型加速管、磁気パルス圧縮器から構成される。電子銃には全固体 Nd:YLF ピコ秒パルスレーザーを用いている。電子銃からの電子パルスの時間幅はレーザーのパルスの時間幅で決まるが、更に磁気パルス圧縮器を用いることでサブピコ秒の極短電子バンチの発生が可能であり、これまでに 98 fs の電子ビームを発生に成功している。この電子ビームと電子銃時間同期したフェムト秒レーザーの極短分析光を組み合わせ、240 fs の時間分解能を有するパルスラジオリシスを実施している。一方、電子銃から得られる電子ビームの平行度が高いことを利用し、これを電子源とした高い時間分解能を持つ動的電子顕微鏡の開発も進行中である。

2-3. 150MeV S バンド電子ライナック

最大エネルギー 150 MeV の S バンド電子ライナックは、熱陰極電子銃と加速管 2 本で構成されている。1990 年頃に機器をメーカーから購入し、設計・組み立てを当時の放射線実験所職員が行ったホームメイドの加速器である。主に低速陽電子ビームの発生のために使われてきたが、コンポーネントの老朽化が著しいため近年は稼働率が低く、廃棄が検討されている。

2-4. コバルト 60 照射施設

電子ライナック設置以前の放射線実験所は RI を用いた研究が行われており、様々な核種の密封線源を用いて研究が行われてきたが、現在ではコバルト 60 のみを利用する施設となっている。照射場所としてはホットケープ 2 室とプールがあり、大気中での各種材料に於ける放射線照射効果、放射線重合、放射線による材料破壊、生物組織に対する放射能影響などの研究に利用されている。約 10 年ごとに 370 TBq の密封線源を購入してきており、現在は表 2 に示す 3 本の線源が利用可能である。

線源名	線源強度	距離 1 mでの吸収線量	線源の大きさ
Rabbit11	99.12 TBq	30.2 (Gy/h)	200 mmL × 20mm φ
Millenium	24.97 TBq	7.62 (Gy/h)	200 mmL × 20mm φ
Dog82	2.34 TBq	0.71 (Gy/h)	150 mmL × 25mm φ

表2 現有コバルト 60 線源

3. 共同利用の状況

量子ビーム科学研究施設は施設専任職員のほか、産研技術室に所属する技術職員と産研内の4つの関係研究室の協力を得て運営されている（主な研究・活動内容は本稿末の添付資料を参照いただきたい）。電子ライナックを利用する場合、単純照射以外は研究目的に特化した計測系が必要となるため、上記4研究室を通じた共同研究が主な利用方法となっている。学内に対しては基本的に年2回共同利用募集を行い、施設の専門委員会でテーマの採択可否を決定し、運営委員会で最終的に承認を得ている。この他に年1回、物質・デバイス領域共同研究拠点における共同利用募集が行われている。また特に専任・兼任教員による国内外研究者との共同利用も可能であり、計3種類の利用方法がある。COVID-19禍前の2019年度の実績として、共同利用採択テーマ数は、所内から13件、学内から8件、学外の研究者を含むものが13件、拠点から11件の合計45件であった。全ての電子線形加速器の2019年度の総利用時間は3,604時間、保守日を除いた総利用時間は3,006時間、総利用延べ日数261日、加速器利用の総課題件数34件であった。主な利用部局は基礎工学研究科、理学研究科、工学研究科、レーザー研があり、学外機関としては東北大学、京都大学、原子力機構、量研機構、理研等からの利用があった。Lバンドライナックの総運転可能時間は年間6,240時間であるが、メインテナンスや夏季・冬季休止期間に1,100時間程度使用しているため、実際は5,100時間程度が実際に共同利用に使用できる時間である。年度により増減はあるが実際の稼働率は約60%となっている。

4. レーザープラズマ電子加速研究

2019年からはJST未来社会創造事業（大規模型）「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」に参画し、レーザープラズマ加速を用いた巨大加速器の小型化に挑戦している。レーザーとプラズマとの相互作用で生成されるレーザー航跡場の電場は従来高周波加速器の加速電場の1000倍を超える～100 GV/mにも達することから、原理的には、kmサイズのGeV級の高エネルギー加速器でさえも卓上サイズで実現すると期待されている[3]。同事業ではX線自由電子レーザーを可能とする超高品質のGeV級電子ビームをレーザー航跡場加速で安定に生成することを目標に掲げている。研究開発は理研播磨（SPring-8）キャンパスの旧SCSS（SPring-8 Compact SASE Source）加速器トンネルにPW級のパワーレーザーをベースとしたレーザー加速研究専用のプラットフォームを構築し、阪大産研、量研機構（QST）関西研が電子加速要素技術を、高エネ研（KEK）がマイクロアンジュレーター技術を提供して研究開発を実施している。図1にSPring-8キャンパスに構築されたレーザー加速プラットフォームの鳥瞰図を示す。加速器トンネル内の上流にはPWワット級レーザーの為のクリーンルーム、下にはプラズマ加速用の真空容器とアンジュレーターを含むビーム輸送ラインが設置されている。

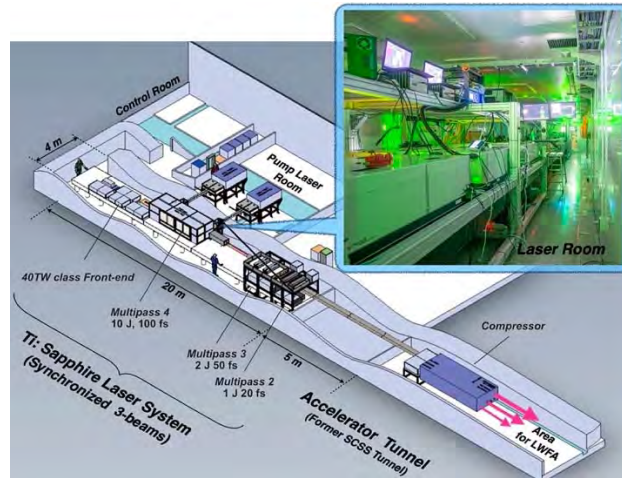


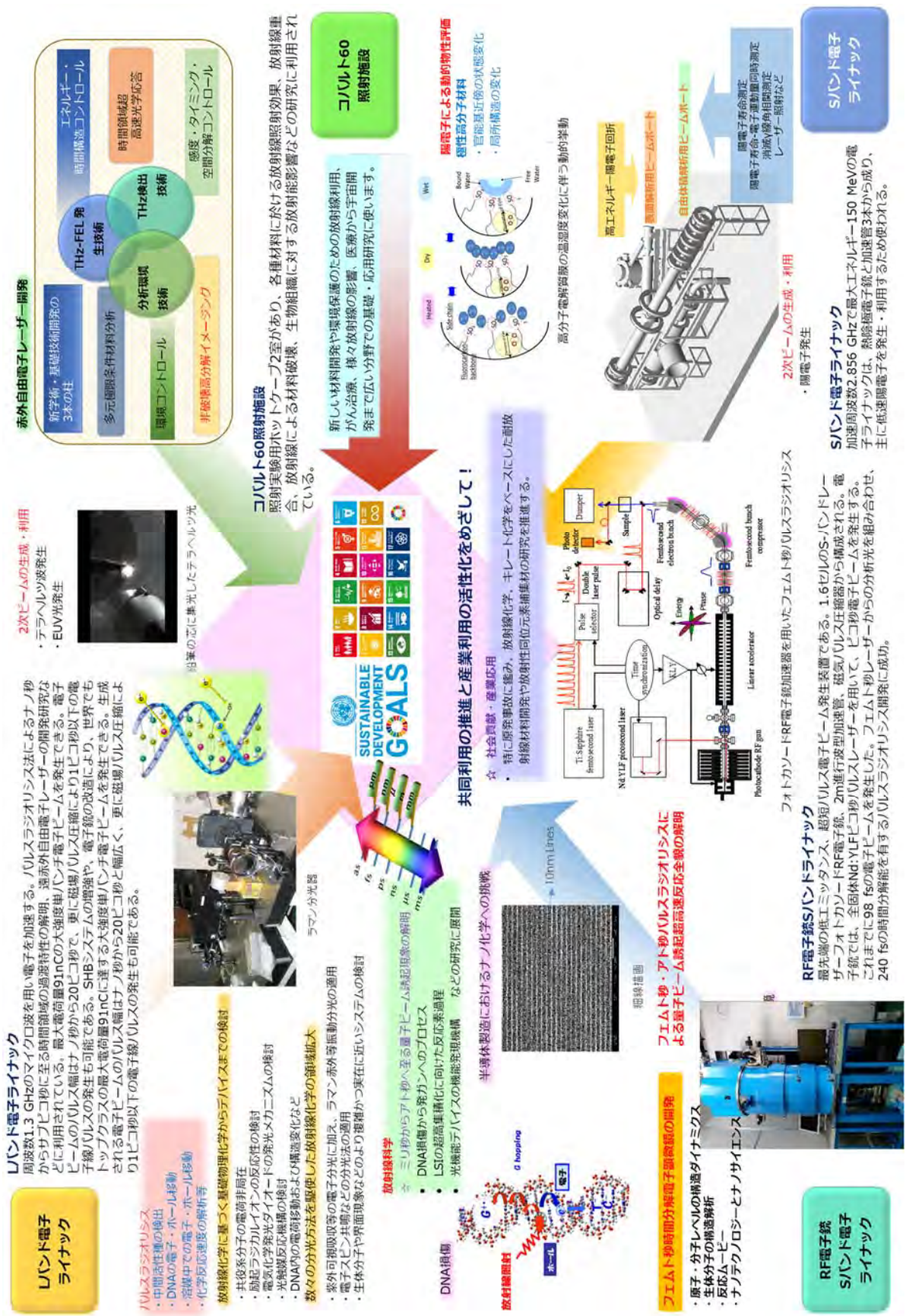
図1 SPring-8 キャンパスに構築されたレーザー加速プラットフォームの鳥瞰図

5. おわりに

阪大産研量子ビーム科学研究施設の装置、利用状況、近年の参画事業について簡単に紹介した。同施設の加速器群は1978年の稼働以降これまでに、学内のみならず学外の研究開発にも大きく貢献し、現在も年間を通じて可能時間一杯に稼働している。しかしながら、施設稼働から既に40年以上が経過し加速器群の老朽化への対応が大きな課題となっている。今後は、多様な外部資金の獲得を目指し、それらの活用による新規加速器への更新、新奇加速器の開発、およびそれらの導入による施設の再生を検討していく。近年のレーザー加速の研究事業への参画もこれへの対応の一つである。高品位で効率的なビーム発生およびその利用に伴う科学技術の基盤を構築すると共に、多様な学術領域との融合研究を進めることで新たな研究領域を開拓することも必要である。

参考文献・資料

- [1] <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/rl/index.html>
- [2] <https://lpa.ims.ac.jp/>
- [3] 細貝知直, 電気学会誌, Vo.l. 141, No1, P27-30 (2021).



添付参考資料(阪大産研量子ビーム研究施設の活動)

講演者略歴



細貝 知直 (ほそかい ともなお)

所属 大阪大学産業科学研究所 第二研究部門 量子ビーム物理分野 教授
住所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1
連絡先 TEL/FAX : 06-6879-8485 / 06-6879-8489、E-mail : hosokai@sanken.osaka-u.ac.jp
学職歴 1997年 博士(理学) 東京工業大学 大学院
総合理工学研究科 エネルギー科学専攻 博士課程 修了
1997年 日本原子力機構 関西研究所 光量子科学センター 博士研究員
2001年 東京大学 大学院 工学系研究科 附属原子力工学研究施設 助手
2005年 東京大学 大学院 工学系研究科 原子力専攻 助手
2006年 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 創造エネルギー専攻
特任准教授
2006年 ウシオ電気 株式会社 顧問
2009年 大阪大学 光科学センター 社会連携部門 特任准教授
2014年 大阪大学 大学院 工学研究科 戦略支援室 准教授
2018年 理化学研究所 放射光科学研究センター
レーザー加速開発チームリーダー ~現在に至る
2019年 大阪大学 産業科学研究所 教授 ~現在に至る

研究・活動分野など レーザープラズマ粒子加速を主軸に量子ビームとレーザープラズマに関する研究開発に従事. 2018年より JST 未来社会創造事業(大規模型)「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」電子加速グループ責任者(PI). 2021年より阪大産業科学研究所 量子ビーム科学研究施設 施設長.