

産業用途向け小型・省電力な 先端量子ビーム発生用加速 器技術の調査研究

2022年7月21日(木)

産業技術総合研究所 研究グループ長
大島 永康

調査研究メンバー



第6回 かけはし成果報告会

(産総研)

大島 永康

満汐 孝治

オローク・ブライアン

澁谷 達則

田中 真人

佐藤 大輔

黒田 隆之助

(KEK)

夏井 拓也

阿部 哲郎

肥後 壽泰

(東工大)

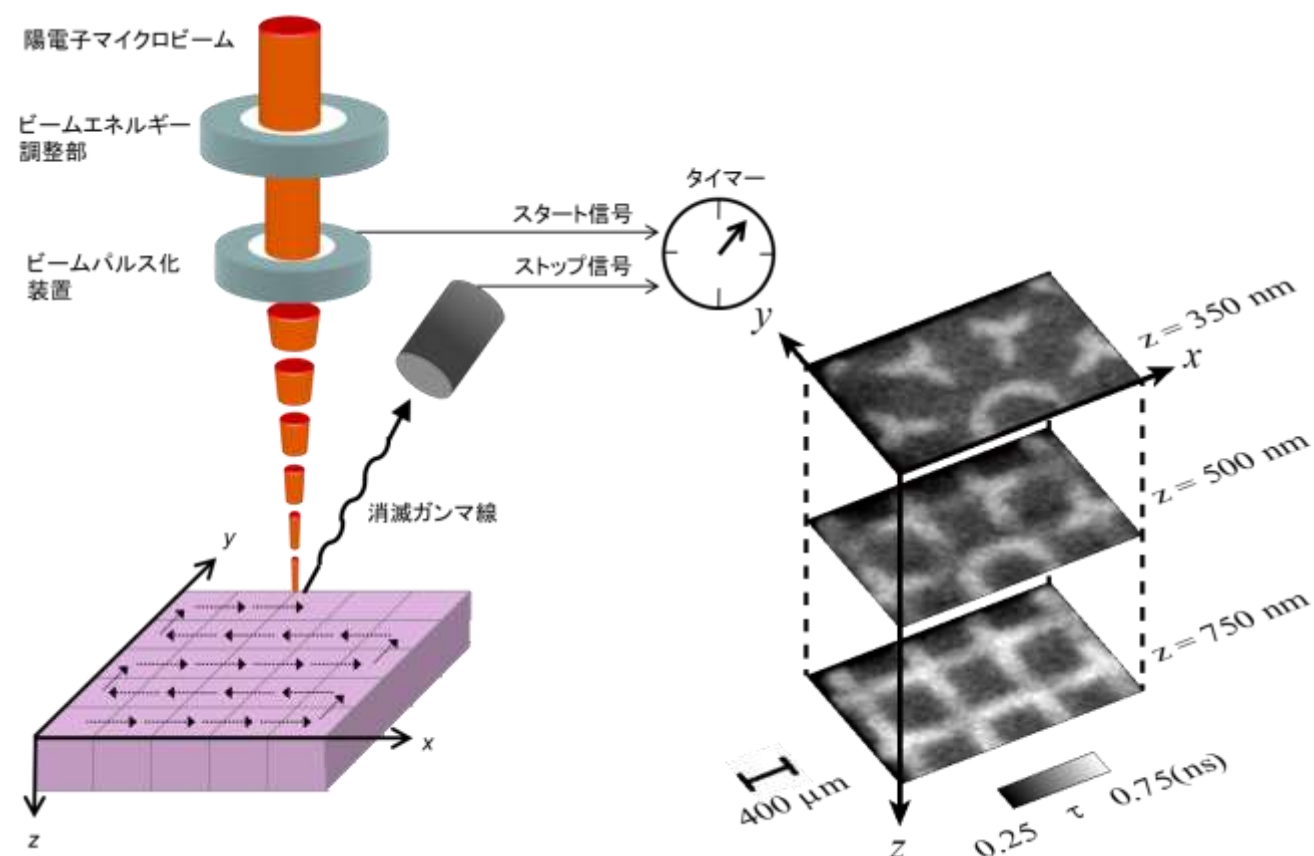
林崎 規託

(秋田高専)

坂本 文人

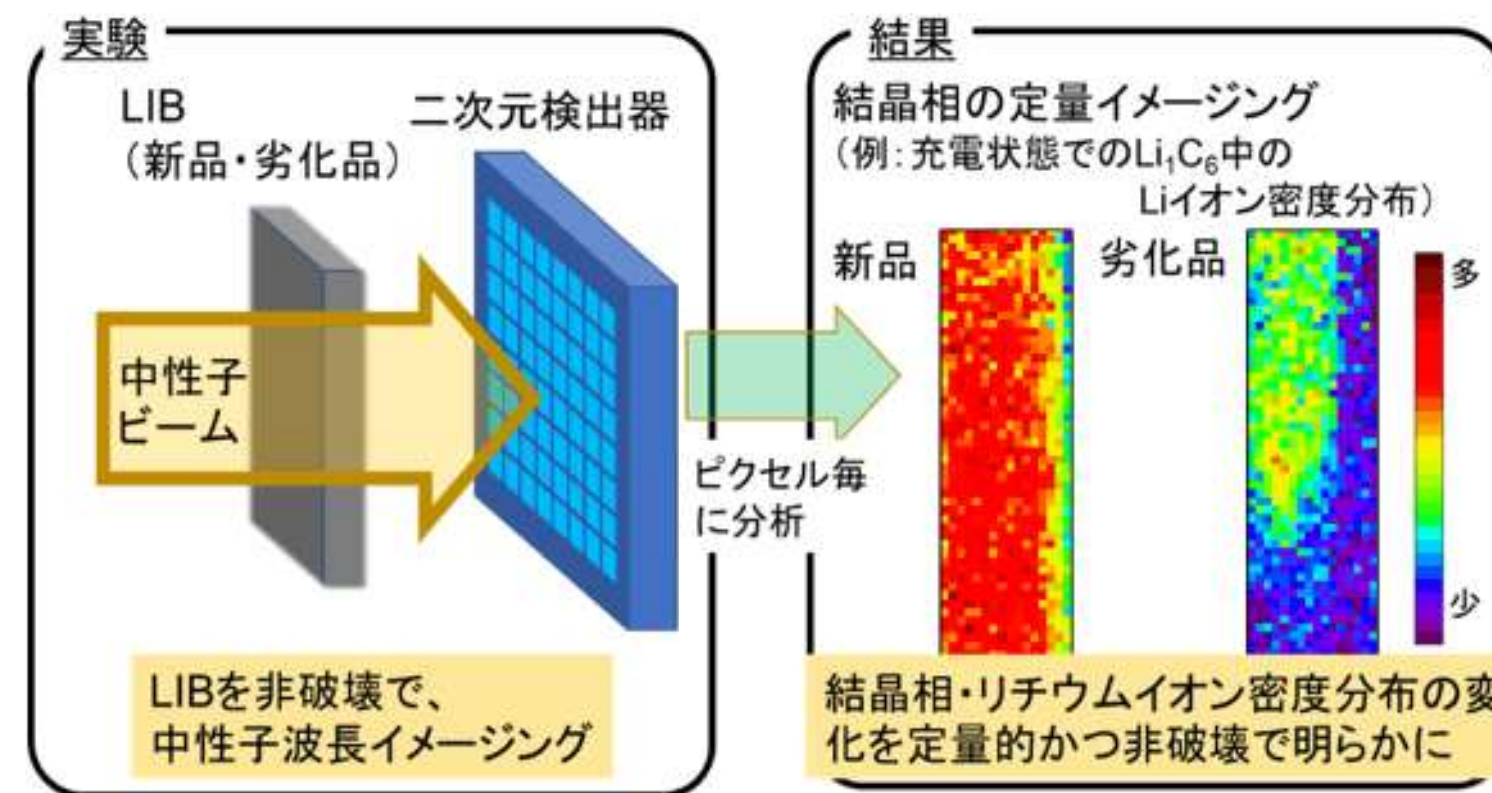
- 量子ビーム計測(陽電子線・中性子線等)は、材料開発や医療等様々な分野で有用性が示されているが、発生用加速器を含む施設の床面積、消費電力、放射線管理といった課題のために新規導入(特に産業界)は容易でない。
- 本研究では、導入を容易にする量子ビーム発生用加速器要素技術を調査する。

陽電子活用例：原子空孔(欠陥)分布評価



引用元:産総研プレスリリース 2008/08/28

中性子活用例：リチウムイオン二次電池非破壊評価



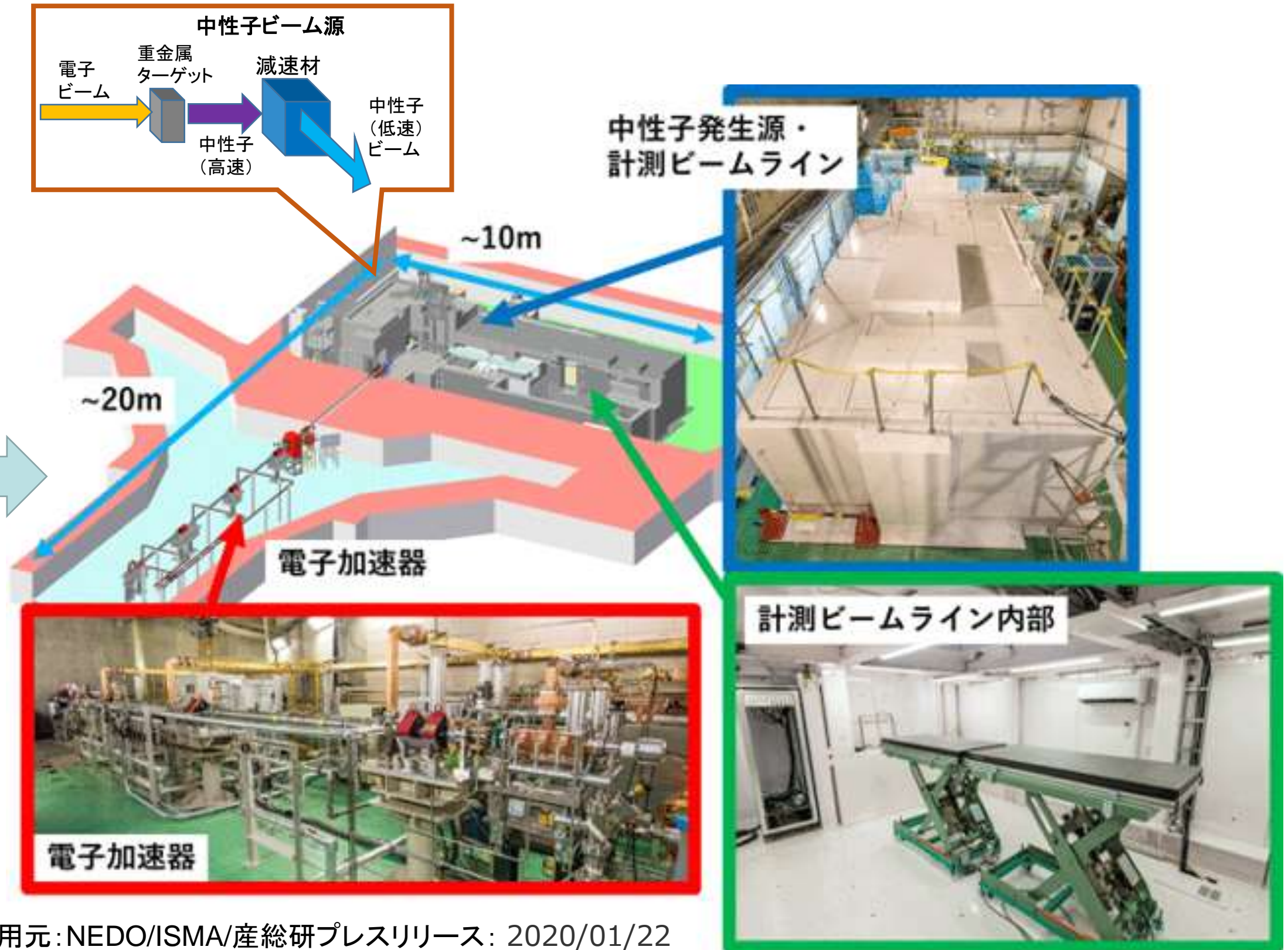
引用元:産総研プレスリリース 2022/02/03

施設例

産総研中性子解析施設 (AISTANS)

電子加速器の設計仕様
エネルギー 40 MeV (最大)
ビーム電流 250 mA
パルス幅 10 μ s (最大)
繰り返し 100 Hz (最大)
ビームパワー 10 kW (最大)

引用元: 産総研・分析計測標準研究部門 HP



引用元: NEDO/ISMA/産総研プレスリリース: 2020/01/22

1. 小型・省エネ化のための次世代加速器要素技術の調査
 - (a) 加速器要素技術の調査
 - (b) Xバンド高周波加速空洞簡易製作法検討(試作)
2. 汎用技術を用いた小型陽電子発生用加速器の設計
3. 産総研量子ビーム計測クラブ研究会等にて施設紹介

加速器は、利用目的(加速粒子・エネルギー・電流)により、種別・仕様が大きく異なる。本調査では、産総研で運用されている陽電子・中性子発生用加速器(電子を数十MeVにまで加速する)への活用を念頭に調査を進めた。

調査研究内容1(a)

小型・省エネ化に資する要素技術をピックアップし、それぞれの技術の特徴を粒子加速電界周波数・加速エネルギー・ビーム電流・照射パワー等の指標にて整理した。
調査した技術の一例を表に示す。

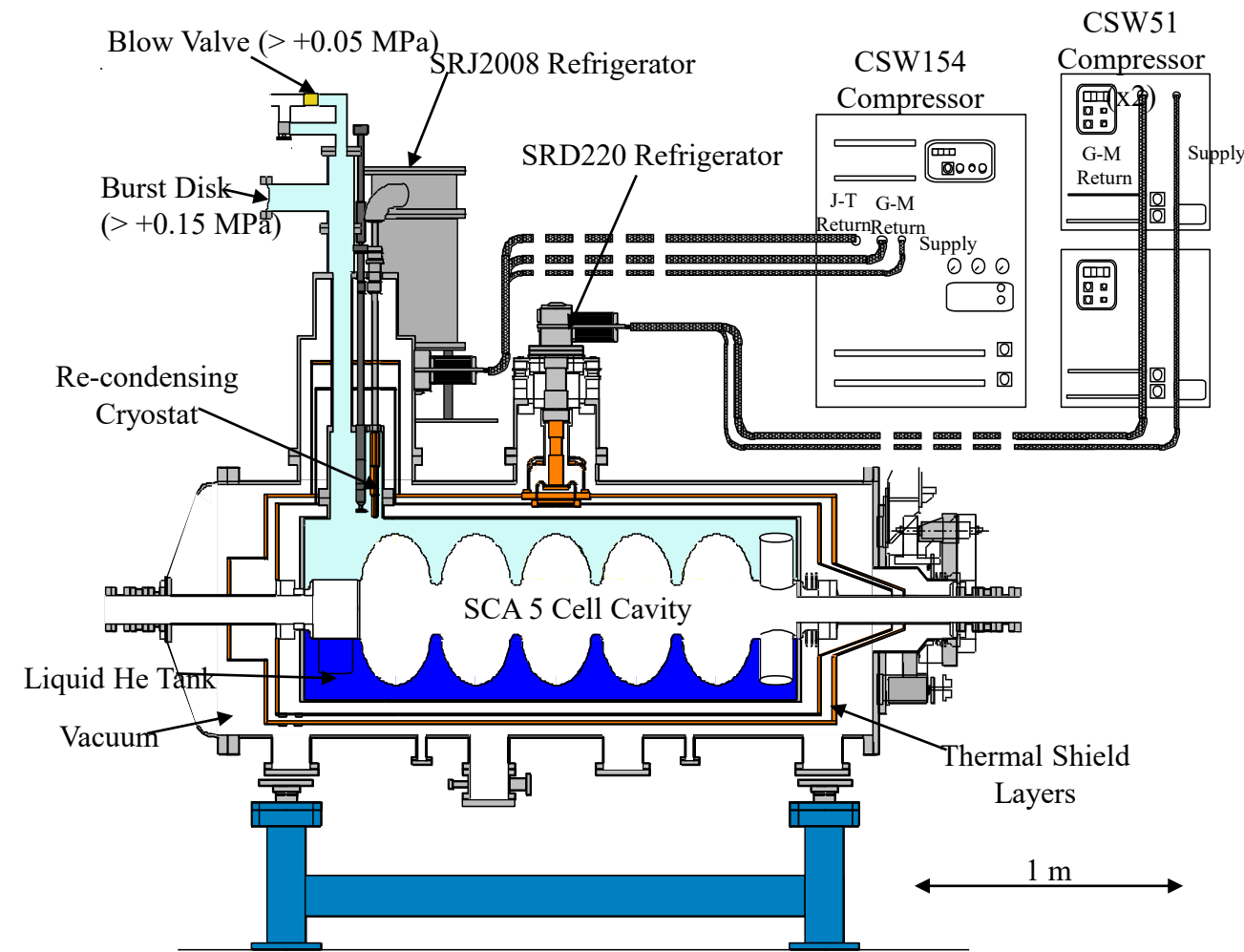
要素技術キーワード	特徴（主に小型化・省エネ化に着目）
RFガン	電子銃の短パルス化、初段加速部の小型化
レーザー誘電体加速空洞	初段加速部の超小型化
Xバンド高周波加速空洞	加速管の小型化
常伝導加速空洞の形状工夫	高効率加速による省エネ化
誘電体を用いた加速空洞	高効率加速による省エネ化
超電導加速空洞（無蒸発型）	高効率加速による省エネ化
リッジトロン	多段加速による大電力化（床面積削減）
陽電子源デザイン	高効率発生による省エネ化

← この2例を
← 次ページで紹介

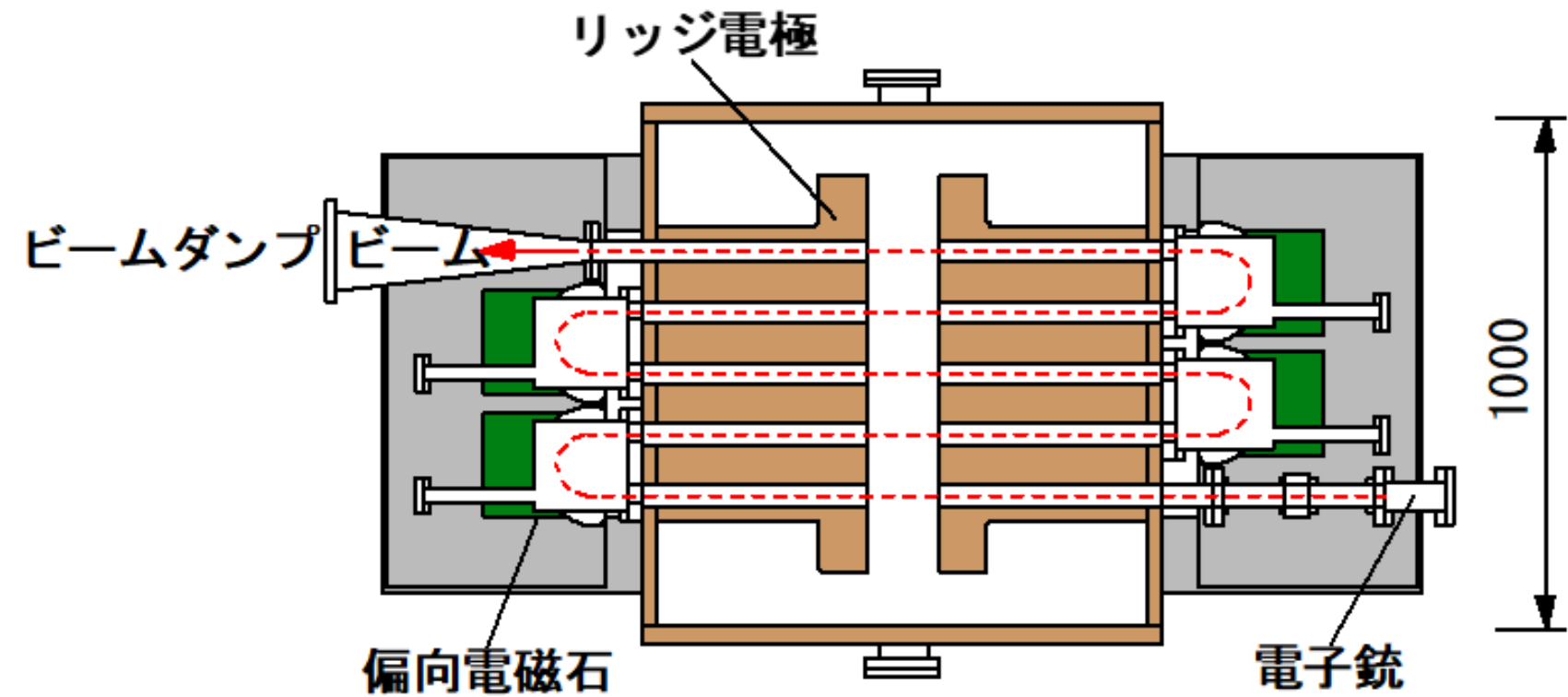
これらの技術は、現在も高度化・洗練化が進行中である。

超電導加速空洞(無蒸発型)

リッジトロン



B. E. O'Rourke et al., NIMA76(2015)83



提供: 東工大・林崎氏

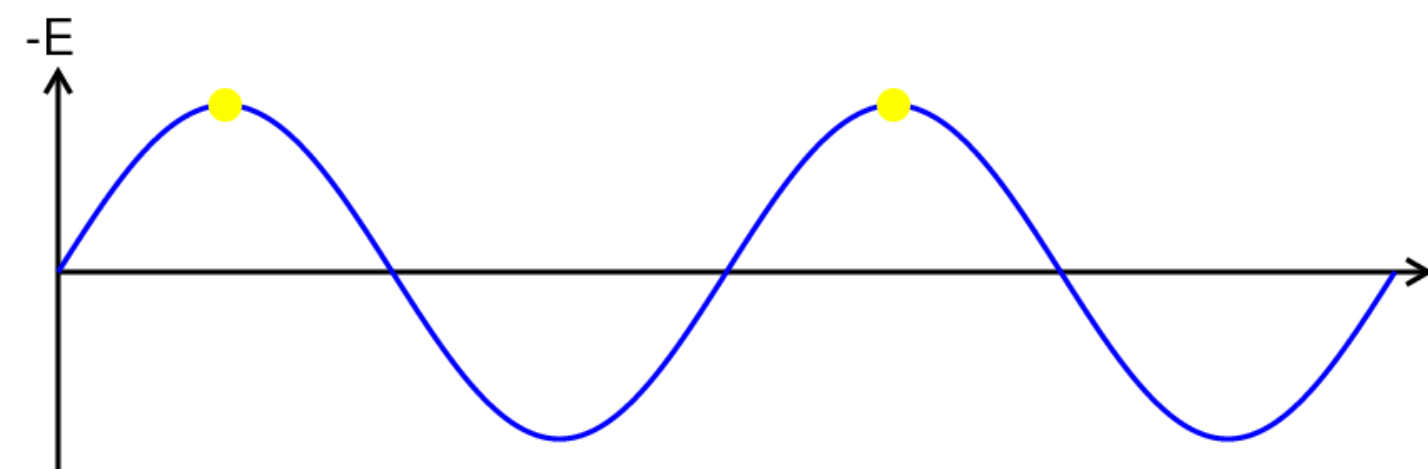
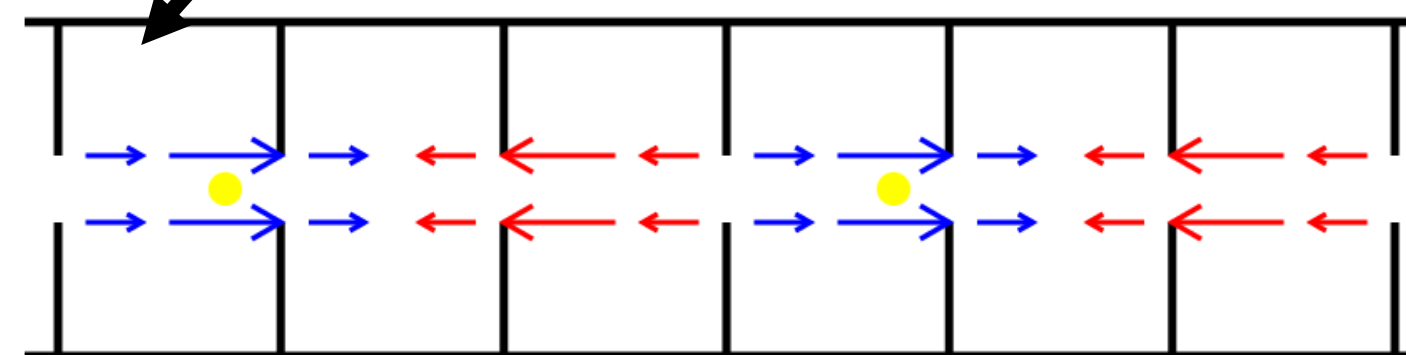
今回の調査には含めなかったが、加速器を設置環境の整備費、各種メンテナンス費も低減することは重要であり、関連技術の発展に着目して、産業利用含む実機の導入計画を議論しつづける必要がある。

調査研究内容1(b)

- ・ 調査した技術の一つであるXバンド高周波加速空洞技術は、実用段階に近いもののひとつであり、産業利用を後押しするための”簡易製(加工)技術”の開発が重要である。
- ・ 旋盤加工が一般的だが、フライス加工に着目して試作を試みた。

- ・ Xバンド・マイクロ波の波長は約3 cm であり、産総研施設で用いているSバンド波長(約10 cm)と比較して短いことから、同じ加速エネルギーを達成するための加速管を短くしやすい。
- ・ 加速空洞セル形状を最適化(ビーム透過部にノズル部を付け加える)することで、高周波入力パワーに対して粒子加速エネルギー向上を期待できる。(XバンドだけでなくCバンド加速空洞にもいえる)

加速空洞セル(Sバンドの2メートル加速管では、その数は60個ほどになる)

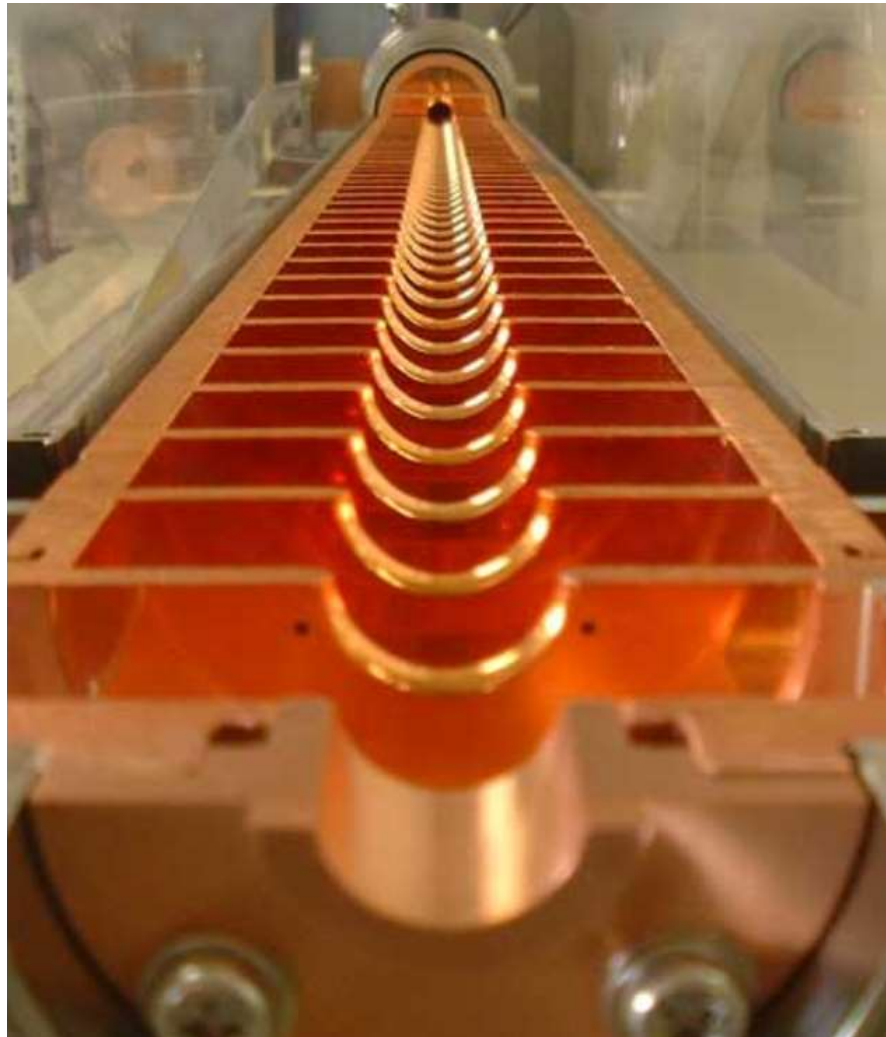


KEK 夏井氏 作成
created by Takuya Natsui

荷電粒子の入射側から高周波を入力し、加速管下流に向かって伝搬する進行波(traveling wave)の加速電場を用いて荷電粒子を加速する加速管

調査研究内容1(b)

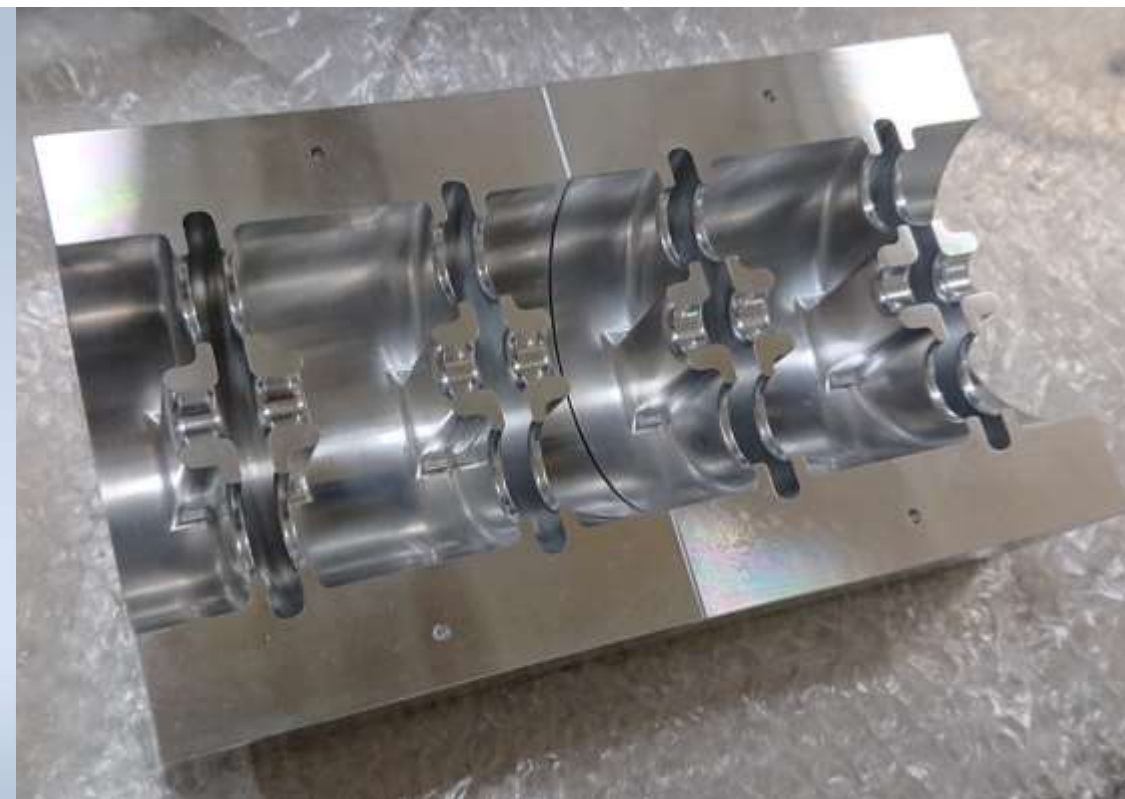
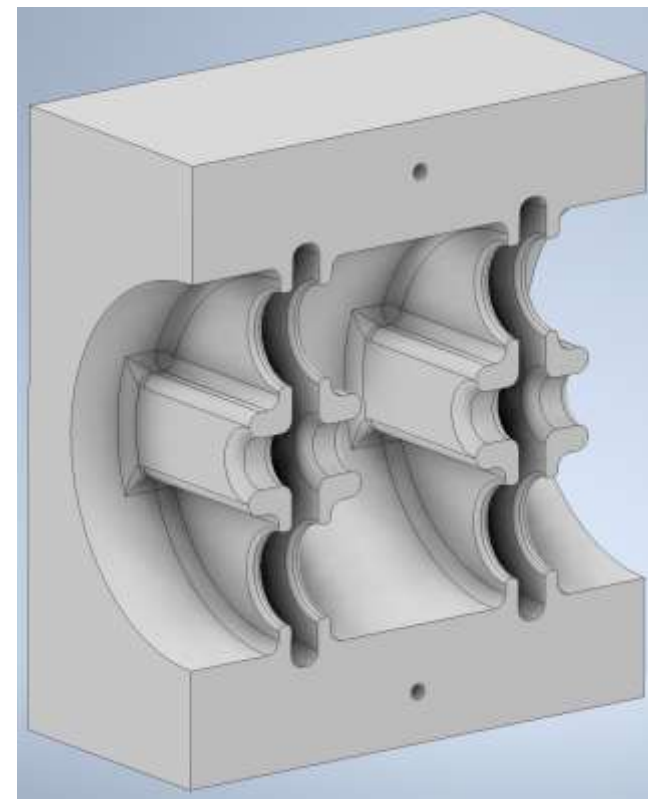
加速空洞 (展示用カットモデル)



ノーズコーン部により、中央ビーム輸送部の加速電界を強くできる

ノーズコーン部の複雑形状や、広範囲加工が容易になる。今回は、アルミニウム材で製作。

半割れ空洞を重ねて1つの空洞になる



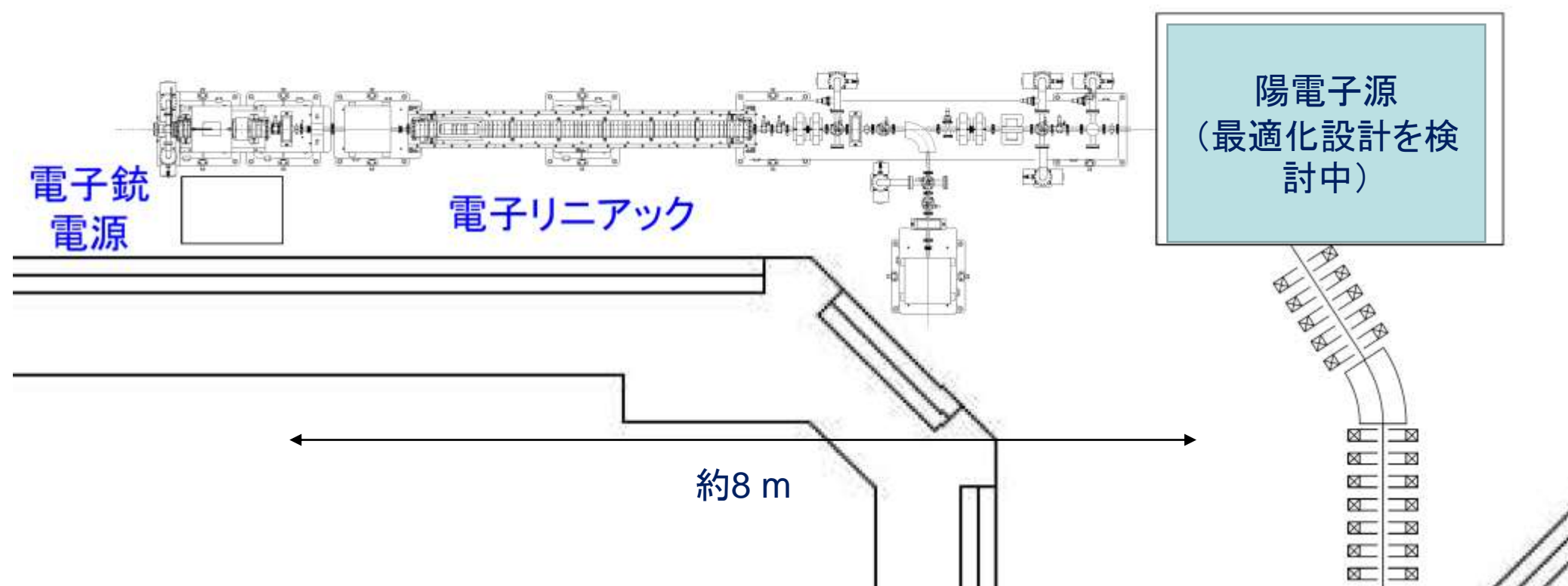
引用元: KEK ホームページ
<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2003/novdec/klystron.html>

低電力高周波検査による試作空洞の特性評価を進めている

調査研究内容2

産総研共用施設内で運用している既存の陽電子発生用電子加速器を、汎用技術を最適化することで小型化・高出力化することを目的に、設計・仕様を検討した。なお、既存電子加速器(全長 ~ 12 m)は、常伝導加速管(マイクロ波加速周波数2.8 GHz)2本で構成されており、その仕様は、**加速エネルギーは ~ 40 MeV、パルス幅は ~ 2 us、出力は数百W**である。

加速管を現状の**2本から1本に削減**するアイデアで設計・仕様を検討した結果(下図)、**全長で ~ 8 m(現状の約2/3倍)、出力で 2-4 kW(現状の ~ 10 倍)**が達成可能であり(電源類更新も含む)、汎用技術でも小型化と高出力化の両性能面を改善できることを示した。



調査研究内容3



国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター



<https://unit.aist.go.jp/rima/rad-imag/Q-beam/index.html>

活動内容

各種量子ビーム(X線、ガンマ線、電子、陽電子、中性子等)の国内産業における利用・技術革新を加速するために、各種量子ビーム源およびそれらを用いた材料分析・非破壊分析等法の開発や高度化を促進するために、以下の活動を実施します。

- 研究会(講演会、勉強会)の開催(1~2回/年)
- 技術相談、共同研究等のマッチング相談
- 分析法の開発・装置利用・環境整備等に関する意見交換
- 分析計測手法の基準提言、技術の橋渡し

運営 産総研 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 X線・陽電子プローブ計測研究グループ、放射線イメージング計測研究グループが中心となって運営

量子ビーム発生用加速器の認知度向上のため、産総研量子ビーム計測クラブ研究会等の機会を利用して、スライドや動画による施設紹介を行った。

研究会開催

第1回:2018年7月

テーマ:「材料構造評価のための量子ビーム分析技術」

第2回:2019年11月

テーマ:「中性子を用いた分析技術と構造材料解析等への応用」

第3回:2020年11月

テーマ:「量子ビーム計測を支える加速器の先端技術」

第4回:2021年12月

テーマ:「次世代半導体開発における陽電子等量子ビームの計測と応用」

(参加者:57名)

まとめ(展望)

装置全体を構成する個々パーツ(電子銃、加速管、量子ビーム源等)の小型・省エネ化要素技術が進展している。

これら要素技術は、程度の差こそあるものの現在も高度化・洗練化が進行中であるため、今後の展開を注視し、実際の施設(産業利用含む)への導入計画を議論しつづける必要がある。