



KEK-iCASAにおける 超伝導高周波加速技術開発

山田 智宏

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設iCASA,
総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科
助教

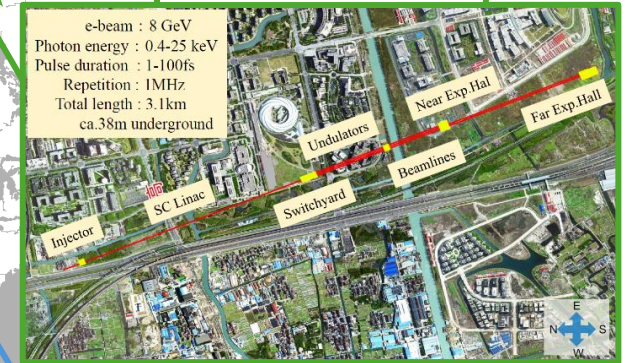
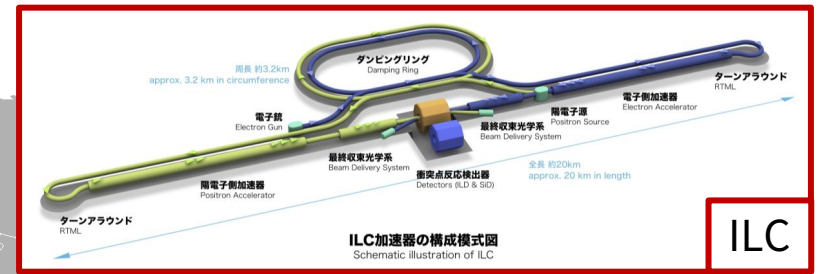
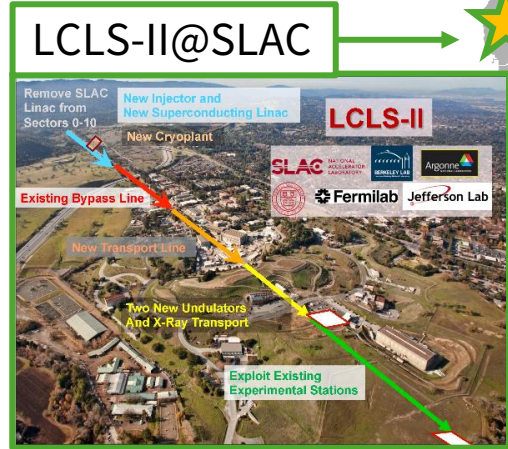
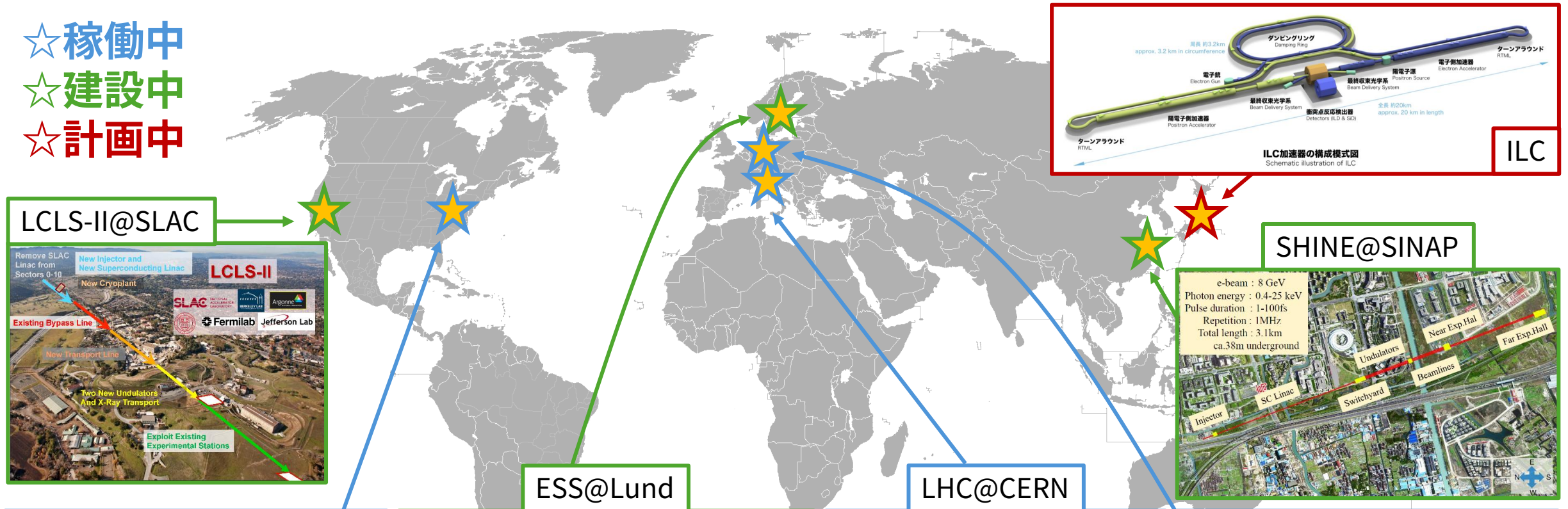
ytomohi@post.kek.jp

世界の超伝導加速器



Courtesy: Y. Yamamoto

- ☆稼働中
- ☆建設中
- ☆計画中



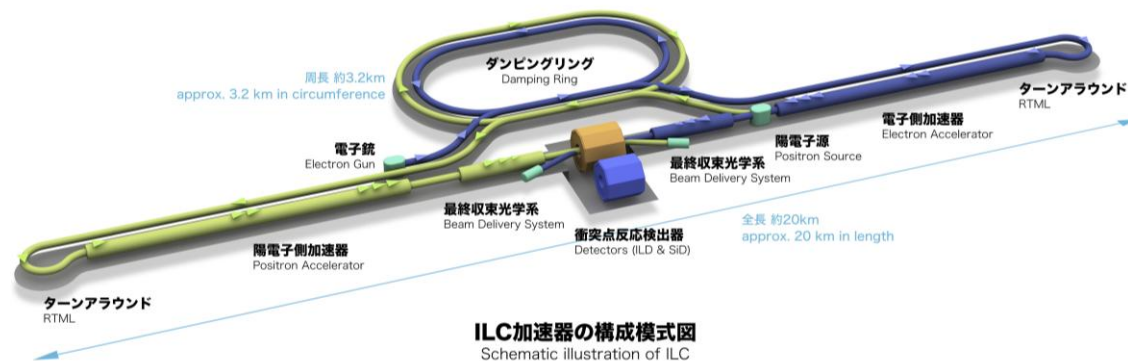
自己紹介



- 名前：山田 智宏
- 所属：KEK 加速器研究施設 応用超伝導加速器イノベーションセンター (iCASA)

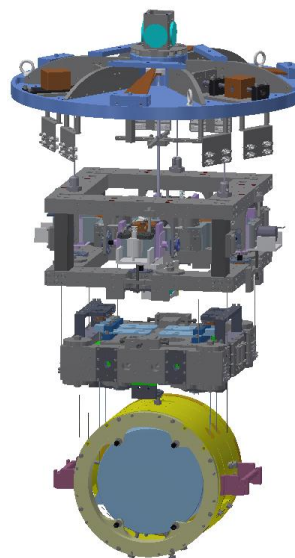
• 現在の研究テーマ：

- ① Nb超伝導加速空洞クライオモジュール
- ② 次世代小型Nb₃Sn超伝導加速器の開発



• 大学院時代：

レーザー干渉計型大型低温重力波望遠鏡KAGRAで、20Kサファイア鏡懸架システムの低振動冷却と制御を担当。

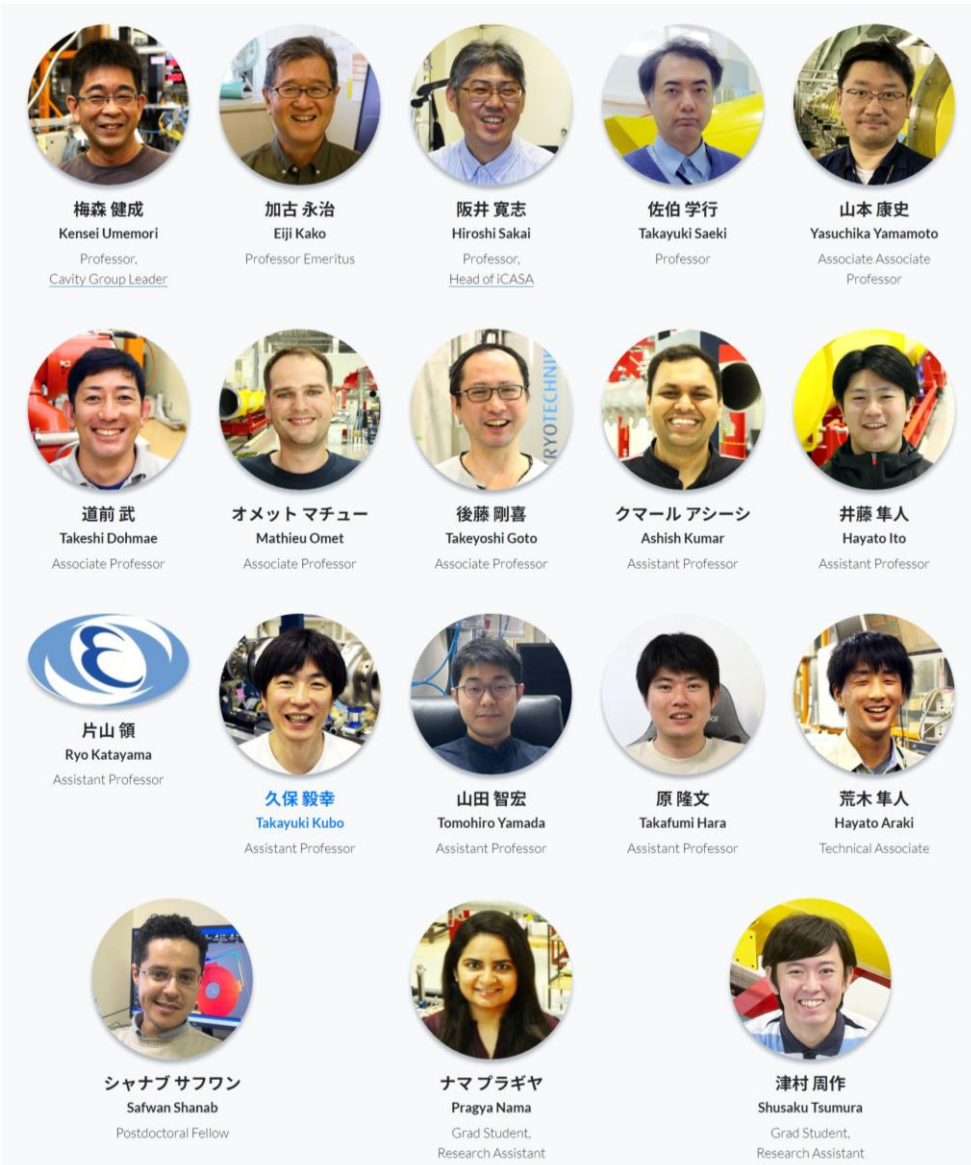


• 趣味：

登山、釣り、スキー



KEK-iCASA 超伝導高周波グループ



メンバー

- 教授：3名 + 名誉教授：1名
- 准教授：4名
- 助教：6名 + 2名新規着任
- ポスドク：1名
- 技術職員：3名
- 大学院生：D3…1名、D2…1名、10月からM1…1名

若手が多く活発なグループ！

研究テーマ

- 超伝導空洞の製造（他部署と連携）
- 超伝導空洞の性能向上レシピの探求、理論
- 超伝導空洞周辺機器の開発
- 超伝導空洞クライオモジュールの設計・製造・運転など…



◆超伝導高周波加速空洞 = Superconducting RF accelerating cavity → **SRF空洞**

- 概要
- 製造方法
- 表面処理、性能評価、最近の研究

◆iCASAで展開するSRF加速器技術開発

- ILCタイプのクライオモジュール技術開発
- compact ERL加速器における半導体製造向けEUV-FEL光源技術開発
- 次世代Nb₃Sn小型超伝導加速器技術開発

◆まとめ



◆超伝導高周波加速空洞 = Superconducting RF accelerating cavity → **SRF空洞**

- 概要
- 製造方法
- 表面処理、性能評価、最近の研究

◆iCASAで展開するSRF加速器技術開発

- ILCタイプのクライオモジュール技術開発
- compact ERL加速器における半導体製造向けEUV-FEL光源技術開発
- 次世代Nb₃Sn小型超伝導加速器技術開発

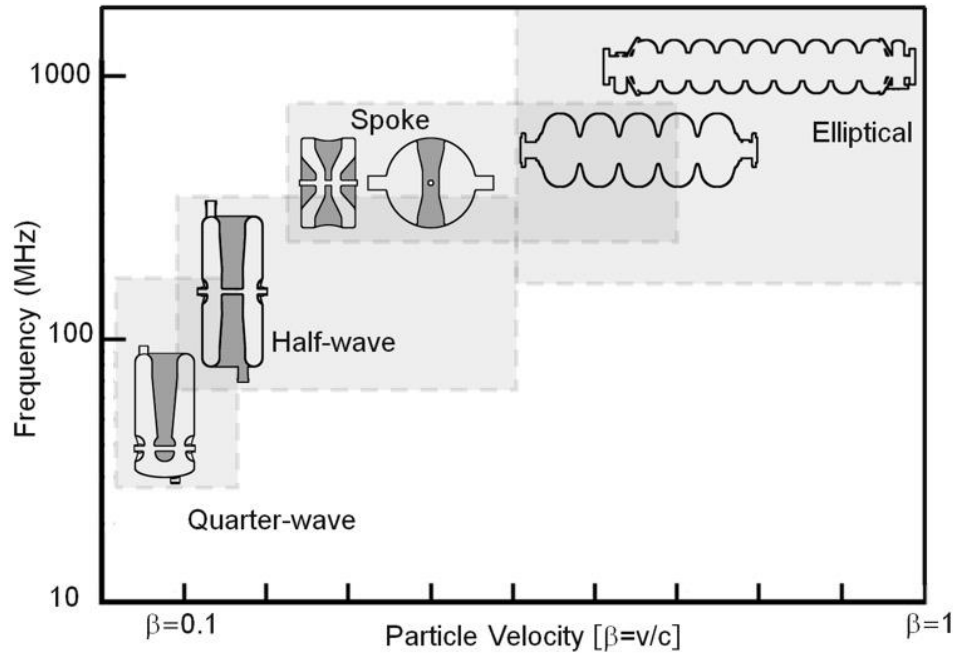
◆まとめ

導入



◆超伝導・高周波・加速・空洞 (SRF空洞) とは「**高周波**エネルギーを溜め荷電粒子ビームを**加速**するために、**超伝導**材料で作られた**空洞** (空間)」のこと。

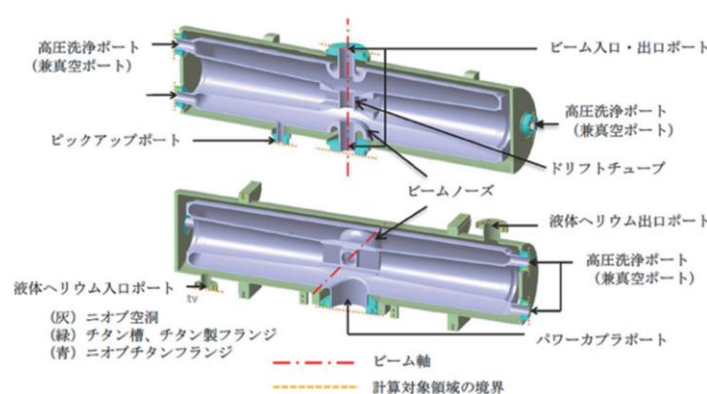
材料：ニオブ(Tc 9.2K)



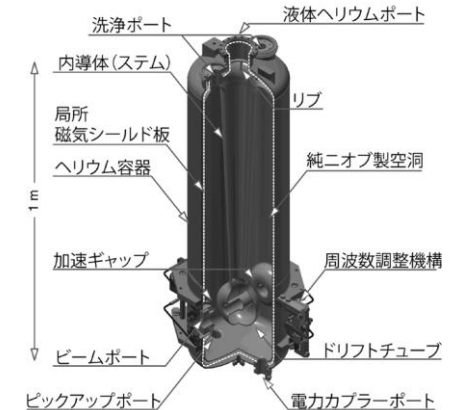
iCASAでは、電子加速用に1.3 GHz楕円空洞を開発



LIPAc@QST六ヶ所研では、重水素加速用に175 MHz HWR空洞を開発



RIBF@理研では、重イオン加速用に73 MHz QWR空洞を開発

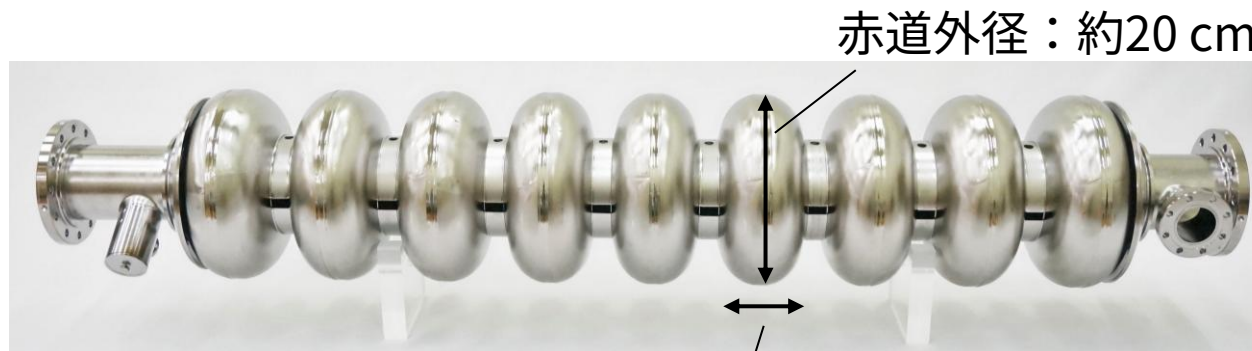
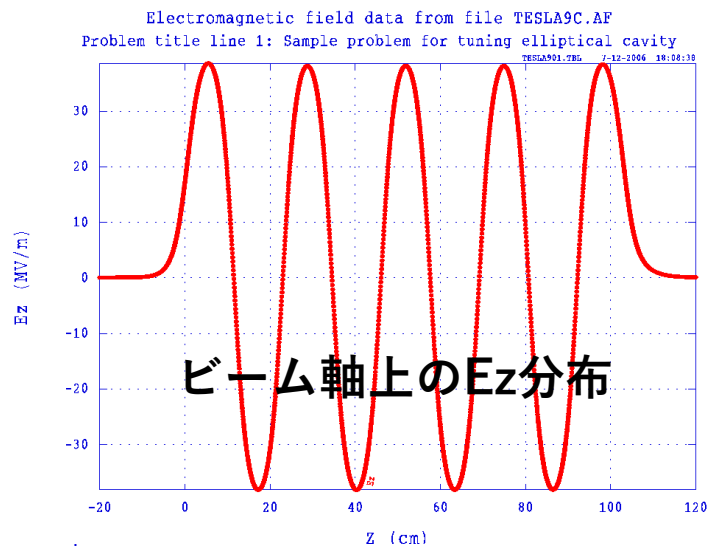


本トークでは1.3 GHz空洞を取り上げます

楕円空洞

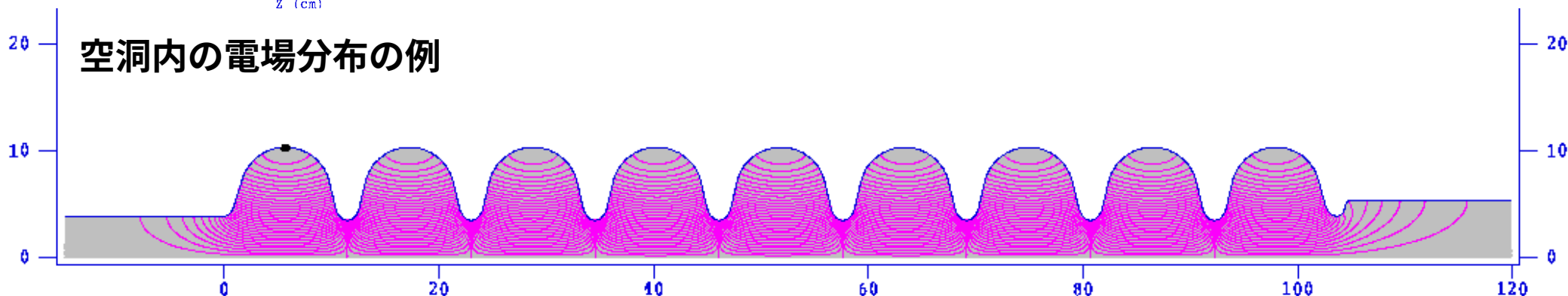
- 光速の粒子がセルの長さを進むごとに、高周波の位相が反転
⇒ 各セルを粒子が通るタイミングで常に加速される

Courtesy: K. Umemori



1.3 GHz空洞の場合

- 半波長 = セル長 = 約11.5 cm
- 9セル空洞の加速部 = 11.5 cm x 9 = 約1m



重要単語・パラメータ、超伝導の利点



- **Q値**：表面損失の逆数

⇒ Q値が高いほど、表面損失（=発熱）が小さい

- **Eacc (加速勾配)**：単位長さ当たりの加速電圧

⇒ Eaccが高いほど、必要空洞数を減らせる

- 表面抵抗(R_s)は以下の式で書ける

$$R_s = A\omega^2 \exp\left(-\frac{E_g(0)}{k_B T}\right)$$

R_s を下げるには、温度を下げる。

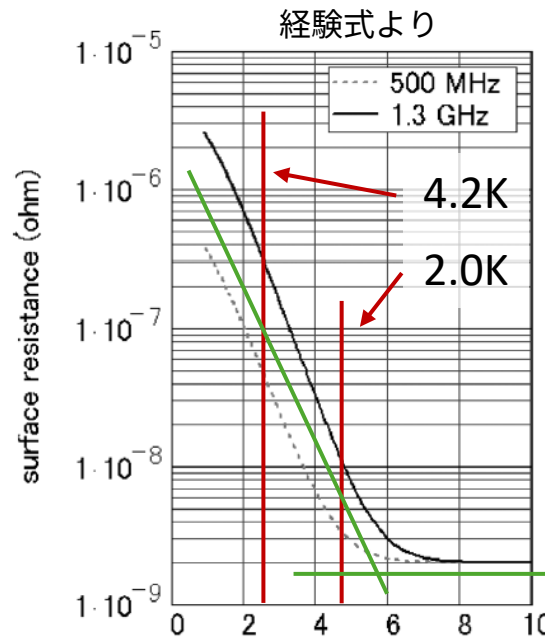
- R_s はBCS理論から導かれる抵抗 R_{BCS} と残留抵抗 R_{res} の和

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

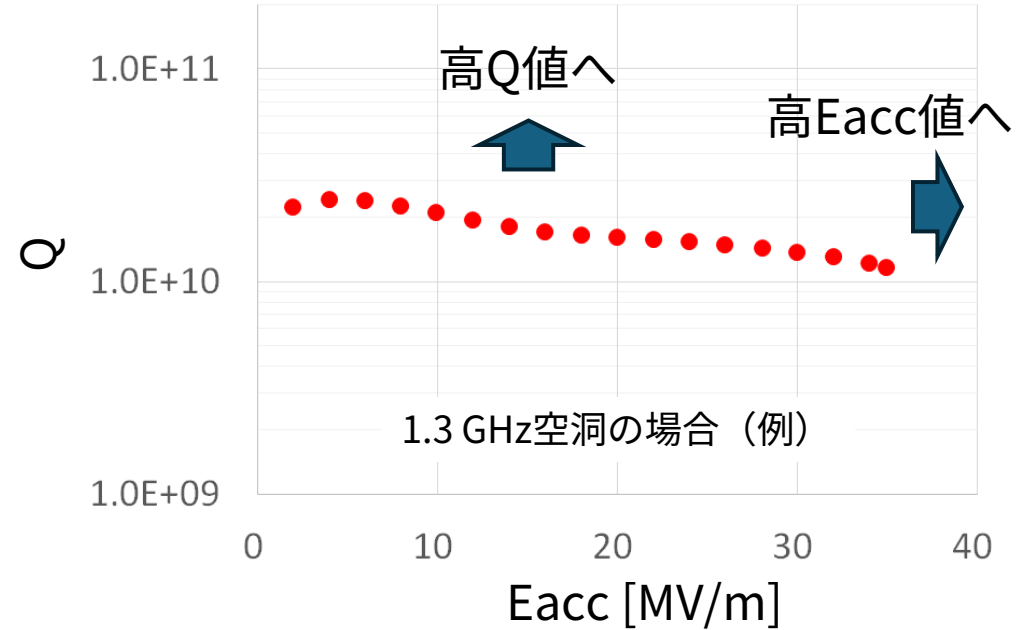
- 高Q化には残留抵抗 R_{res} を下げる
ことが重要

⇒ 良い空洞に良い表面処理を施し良い環境を

Courtesy: K. Umemori



$T_c = 9.2K, R_{res} = 2 \text{ n}\Omega$



超伝導の利点

超伝導空洞の R_s : $\sim \text{n}\Omega$
常伝導空洞の R_s : $\sim \text{m}\Omega$ 6桁も違う

超伝導空洞では、連続運転が可能
常伝導空洞では、パルス運転が主

ニオブ(Nb)で空洞を作る

◆ニオブ(Nb)の理由

物理：超伝導転移温度が高い ⇔ 温度を下げることで R_{BCS} を効果的に下げられる。

物理：臨界磁場が高い ⇔ 空洞内の強い磁場でもクエンチしにくい。

加工：高純度化しやすい (Ta以外) ← R_{res} の低減

加工：プレス加工時の延性が良い

加工：電子ビーム溶接の溶接性が良い

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}, \quad R_s = A\omega^2 \exp\left(-\frac{E_g(0)}{k_B T}\right)$$

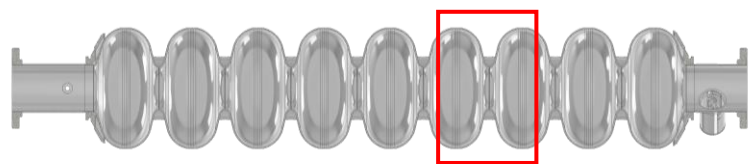
Courtesy: T. Dohmae

Tc [K]				
Sc 19.6	Ti 0.5	V 5.4	Cr	Mn
Y 19.5	Zr 0.85	Nb 9.25	Mo 0.92	Tc 8.2
	Hf 0.38	Ta 4.5	W 0.01	Re 1.7
	Rf	Db	Sg	Bh

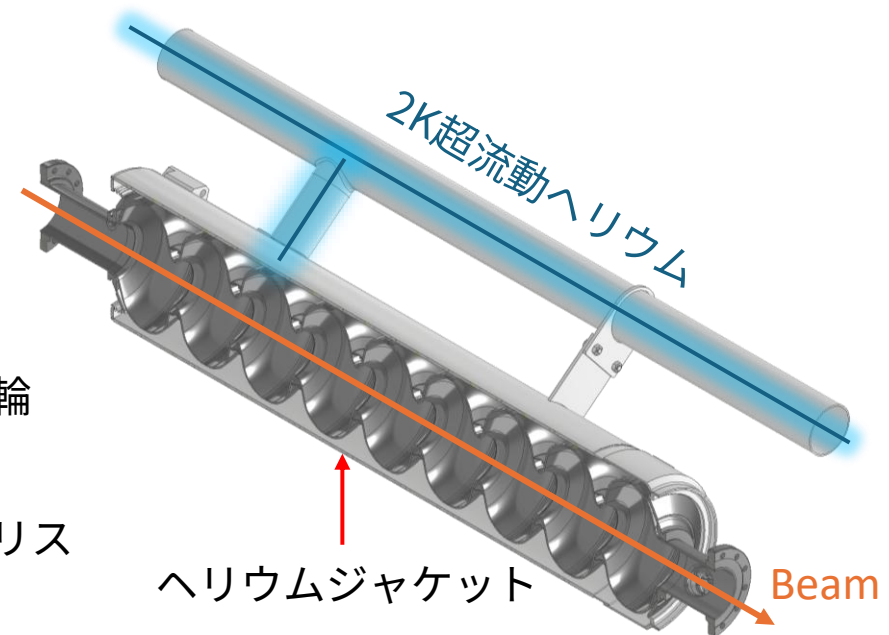
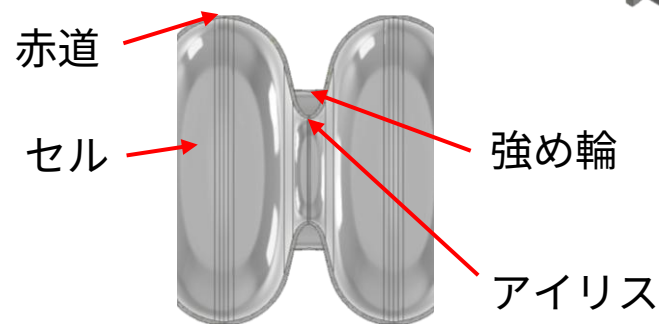
	Type	Tc [K]	Hc1 [Oe]	Hc [Oe]	Hc2 [Oe]
Pb	I	7.20	-	800	-
Nb	II	9.2	1700	2060	4000
Nb3Sn	II	18.3	380	5200	240000

◆Nb製1.3 GHz 9セル空洞

- 各パーツを電子ビーム溶接により接合

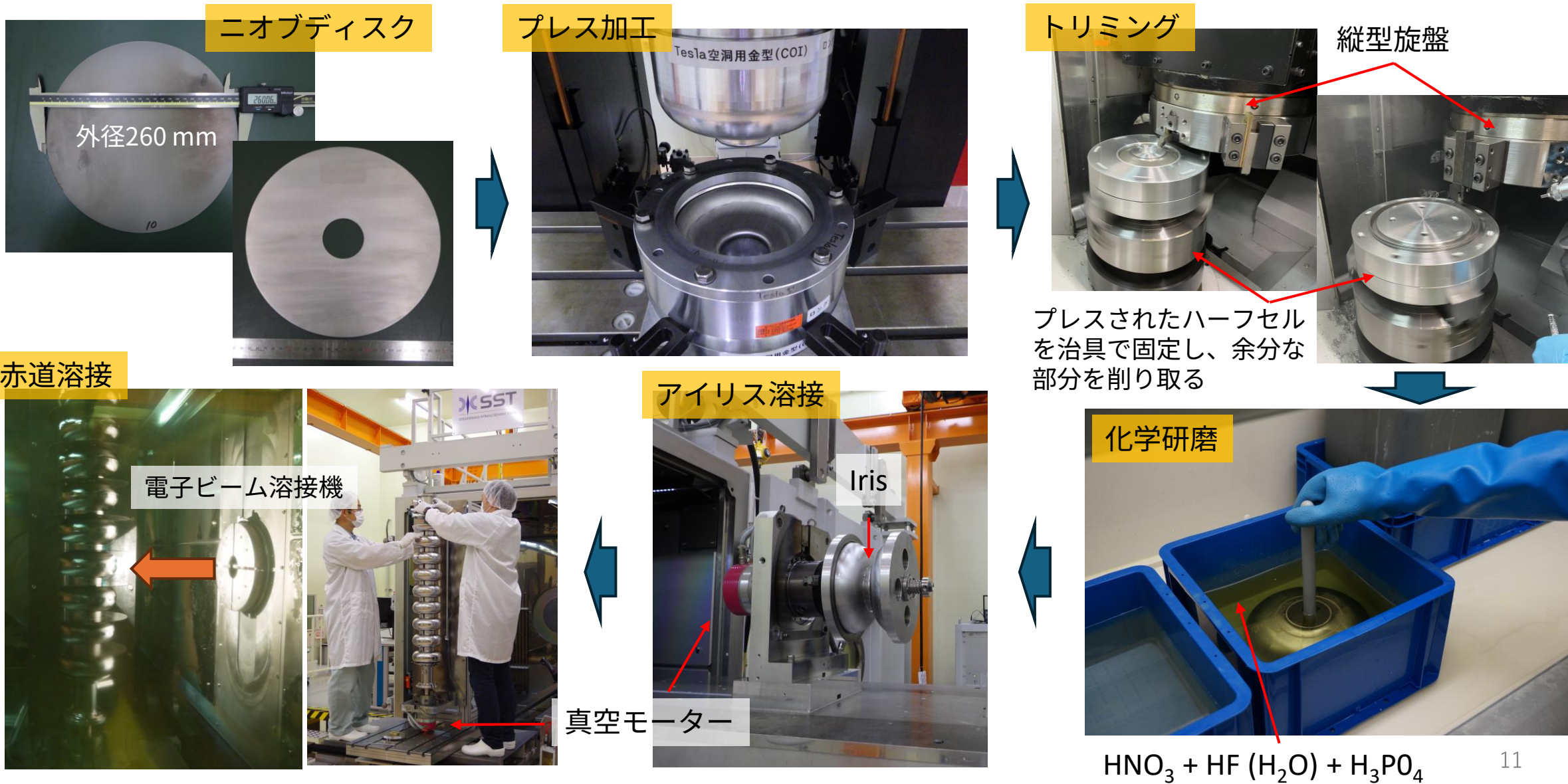


- チタン製ジャケットとの間を2K超流動ヘリウムで満たし浸漬冷却

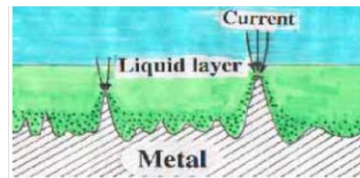


空洞製造プロセス

Courtesy: T. Dohmae

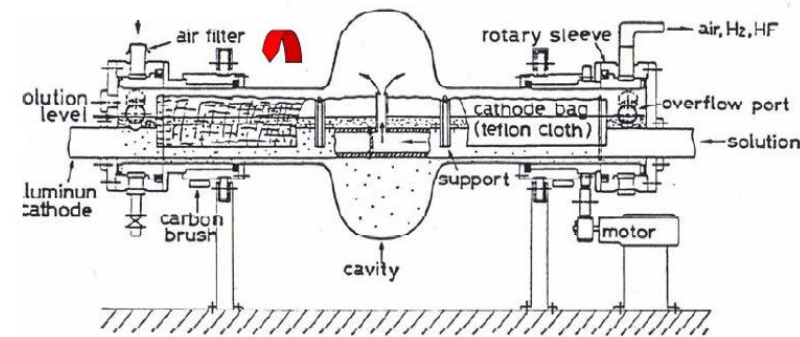
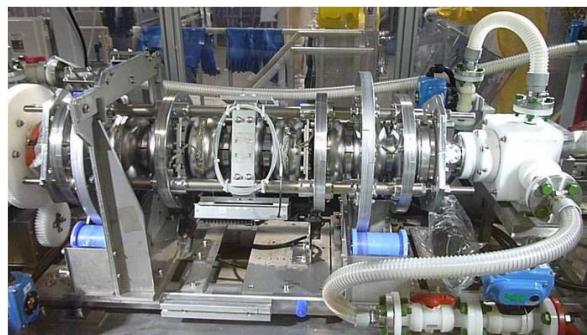


表面処理



◆電解研磨：

- 空洞に硫酸とフッ酸の混合液を入れ、電流を流すと内表面を平滑にできる
- このとき水素ガスが発生
$$2\text{Nb} + 10\text{HF} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{NbOF}_5 + 5\text{H}_2$$



◆ベーキング

- 電解研磨中にニオブ中に取り込まれた水素の排出
- 製造時の加工ひずみを取る



◆HPRとクリーンルーム

空洞内にゴミが入ると、性能が著しく低下

- 8-10 MPaの超純水で空洞内を高圧洗浄 (HPR)
- クリーンルーム内(ISO class4)での空洞組立



空洞性能評価試験設備



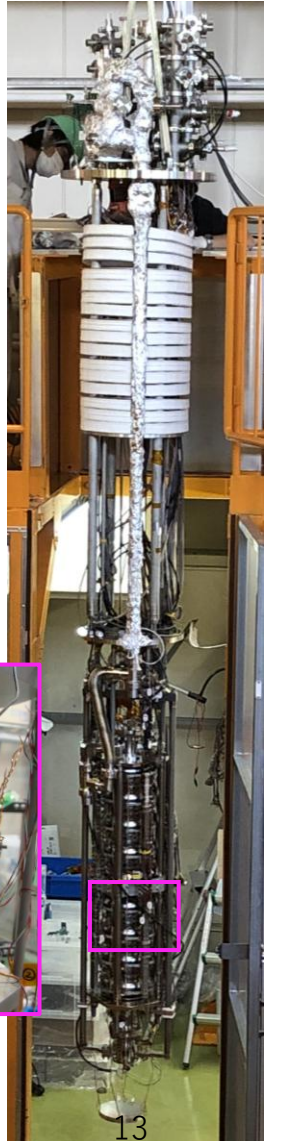
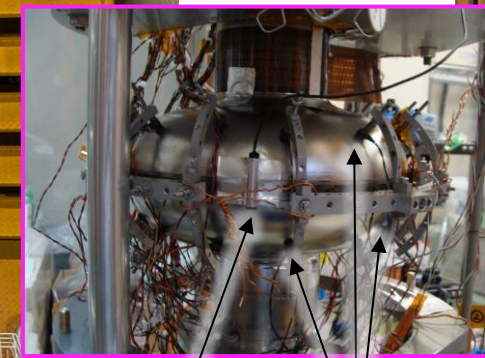
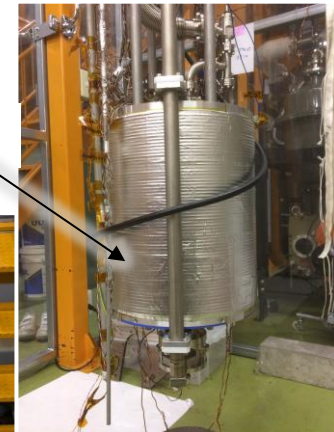
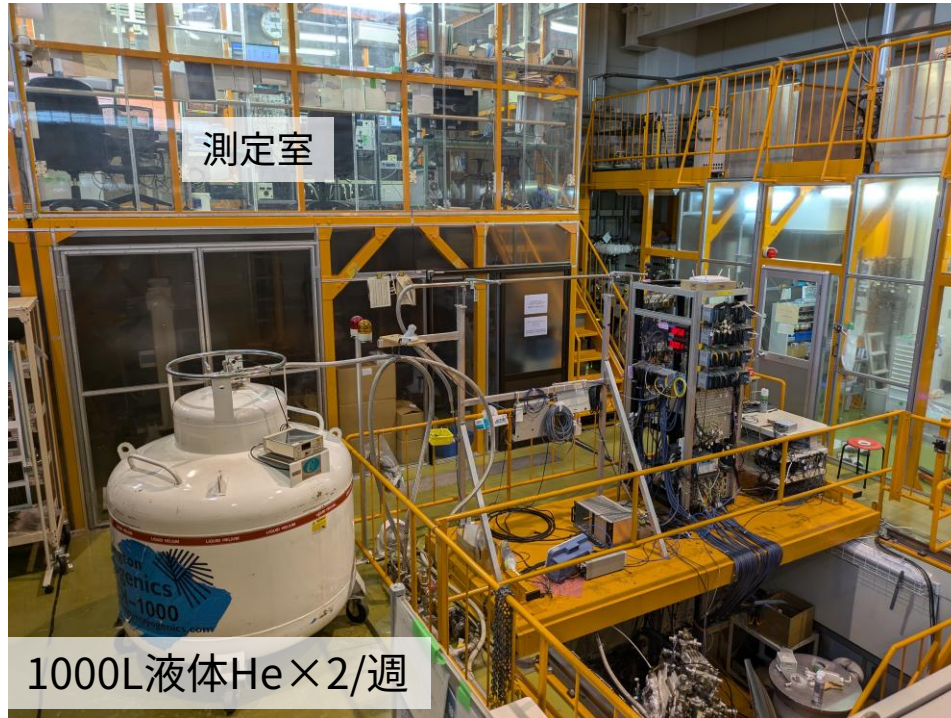
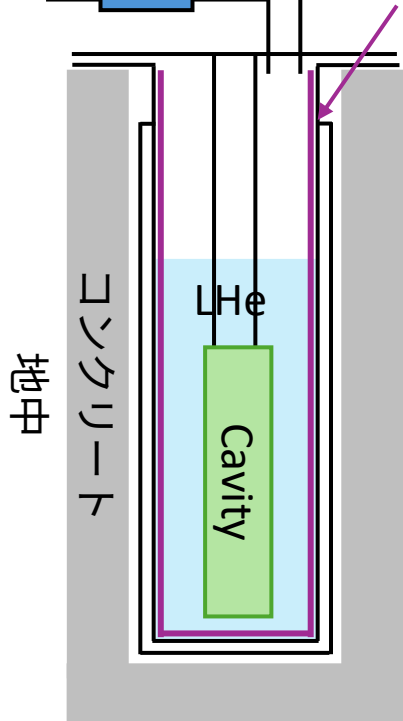
- 地下に設置されたクライオスタットに空洞と液体ヘリウムを入れ、減圧し2K到達後、RF試験
- 超伝導転移の際に環境磁場をトラップすると R_{res} が増加するため、磁気シールドがクライオスタット内に設置されている。追加コイルで磁場環境を変化させ試験することも可能。
- クエンチ箇所を特定するため、大量の温度センサーをセル周りに配置。

準備→冷却→RF測定→昇温で1週間のサイクル

減圧ポンプ

磁気シールド

ソレノイドコイル



最近の空洞性能



Courtesy: H. Ito, K. Umemori

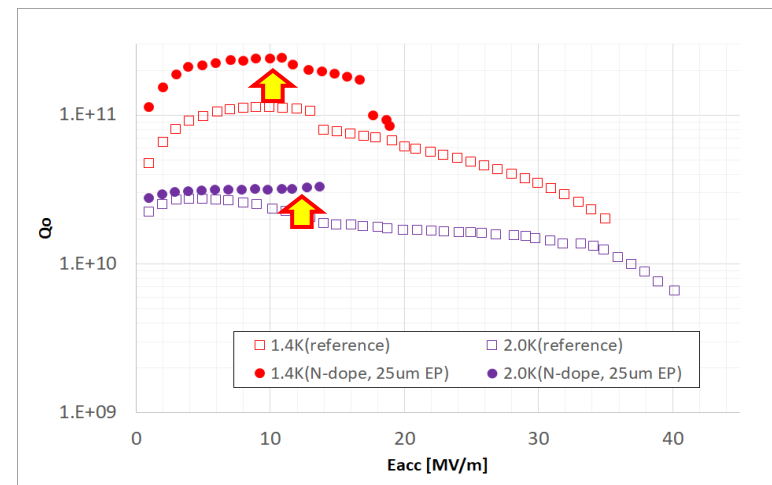
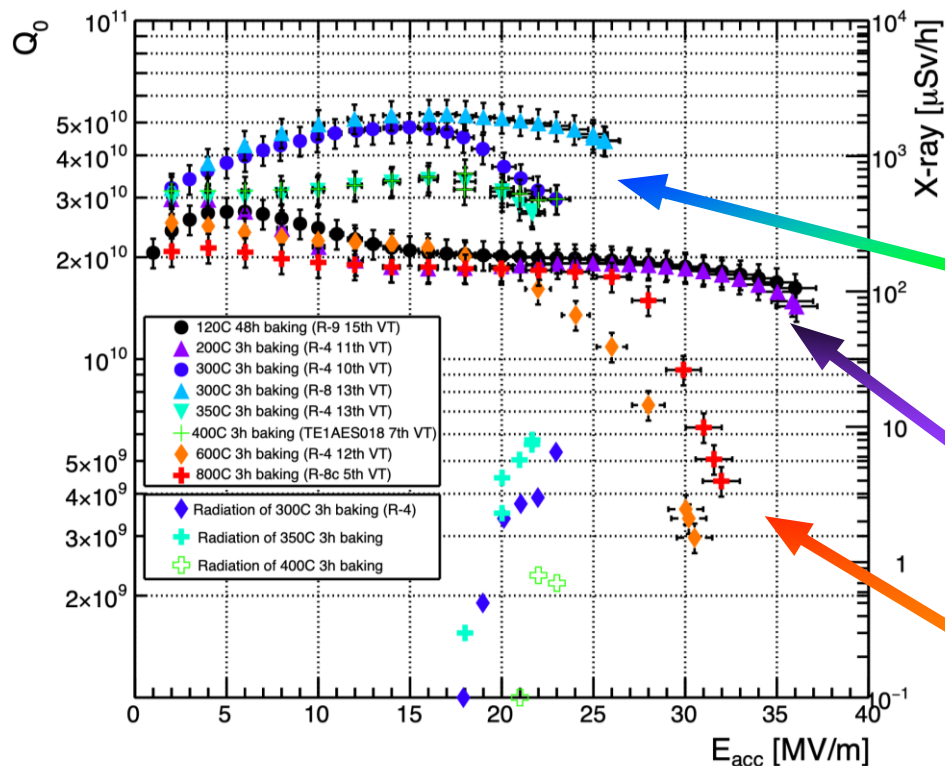
◆窒素ドーピング

KEK 1.3GHz単セル空洞での窒素ドーピングの結果→

高温ベーキング(800°C)の際に、短時間(数分~数十分)真空炉に窒素を導入

数10umの深さまで窒素が入り込む。表面層は電解研磨で落とす。

⇒ Q値は向上 加速勾配は減少



◆熱処理温度依存性

真空炉ベーキングの温度・時間により、空洞性能が大きく変わることが発見された。(KEK発)

300 ~ 400°C, 3h

- 非常に高いQ値とanti-Q slopeが得られる。
- 300°C熱処理では、2K, 15MV/mで5e10を超えるQ値が得られた。

Standard recipe (120°C, 48h), 200°C, 3h

- 標準処理(120°C, 48時間ベーキングの結果に近い)。
- 加速勾配が一番高い。

600 ~ 800°C, 3h

- 高いQ値は得られない。
- 25MV/mを超える加速勾配でQ値が劣化

高Q値、高Eaccに向けて、熱処理条件の最適化を理論と実験の双方から実施中



◆超伝導高周波加速空洞 = Superconducting RF accelerating cavity → SRF空洞

- 概要
- 製造方法
- 表面処理、性能評価、最近の研究

◆iCASAで展開するSRF加速器技術開発

- ① ILCタイプのクライオモジュール技術開発
- ② compact ERL加速器における半導体製造向けEUV-FEL光源技術開発
- ③ 次世代Nb₃Sn小型超伝導加速器技術開発

◆まとめ

これまでのKEKでのSRF開発

Courtesy: H. Sakai



COI: Nb₃Sn成膜,
大型クリーンブース

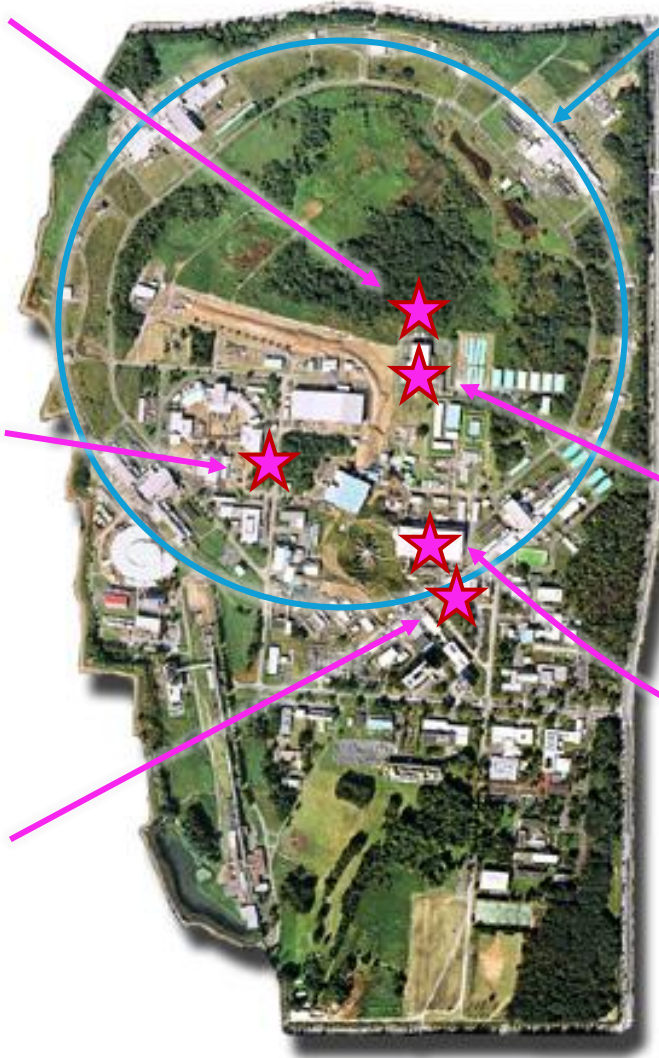


AR東第2: Nb₃Sn伝導冷却



CFF: 空洞製造

KEKつくばキャンパス



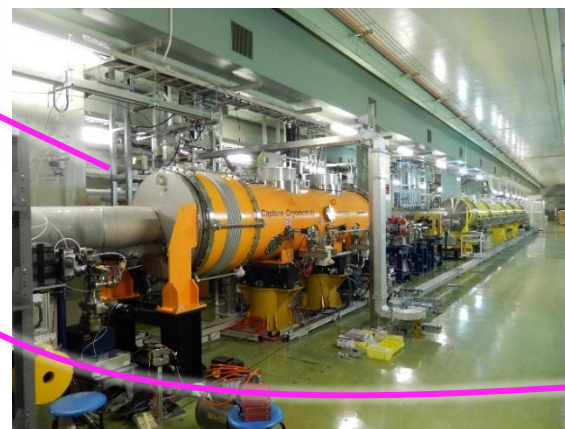
1980年代から超伝導空洞開発
TRISTAN/KEKB/SuperKEKB



508 MHz TRISTAN (1989)



508 MHz KEBK (1998)



STF (2005-)
超伝導空洞開発、電界研磨、
縦測定、モジュール試験
ILC用 Long-pulseビーム運転



compact ERL (2013-)
エネルギー回収実証、
モジュール試験
産業応用利用でCWビーム運転

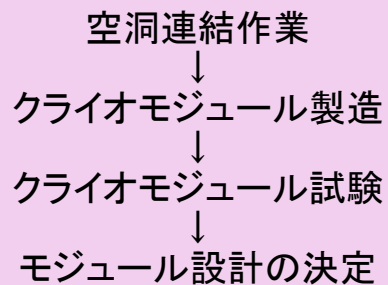
① ILCタイプのクライオモジュール技術開発

Courtesy: S. Michizono, Y. Yamamoto

WPP-1: 空洞処理の流れ



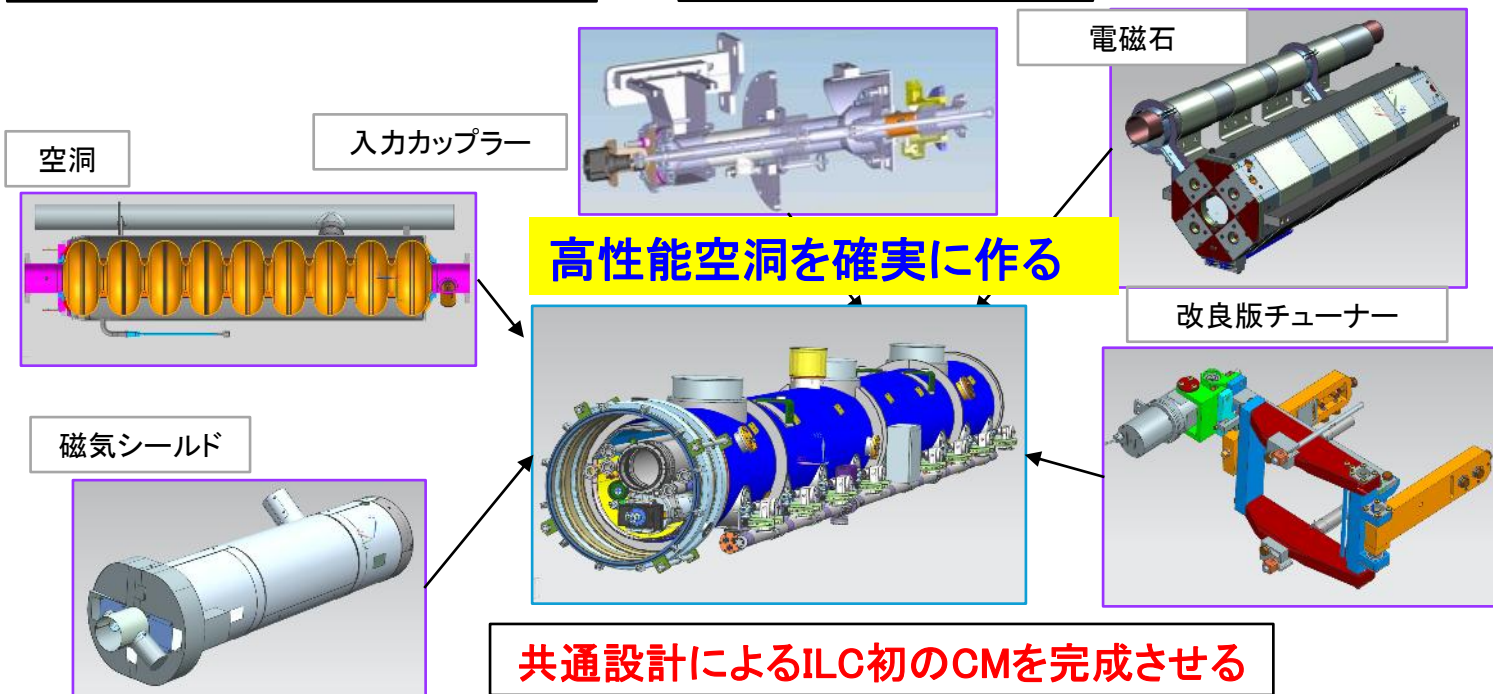
WPP-2: CM製造・試験の流れ



- ◆ 国内で1台のクライオモジュール (CM) を製造 (WPP-2)
- ◆ 製造された空洞 (WPP-1) のうち8空洞を実装 (海外からの持込含む)
- ◆ 日本の高圧ガス保安法に整合

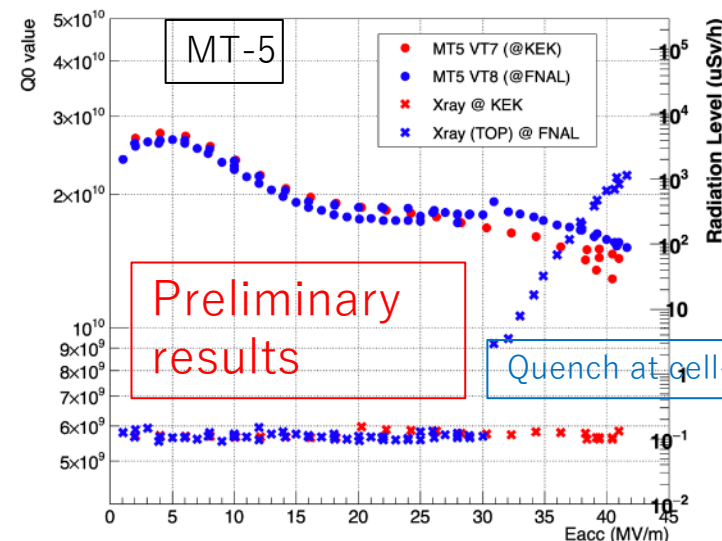
(最終確認事項)

- ◆ 付属部品 (入力カップラー、チューナー、超伝導電磁石、磁気シールド材) 実装
- ◆ 設計変更 (Change request) の検討



2023年度成果

2段階ベーキングを適用したFine grain 9セル空洞で40MV/m以上の性能を達成



詳細は原さんのポスターで説明

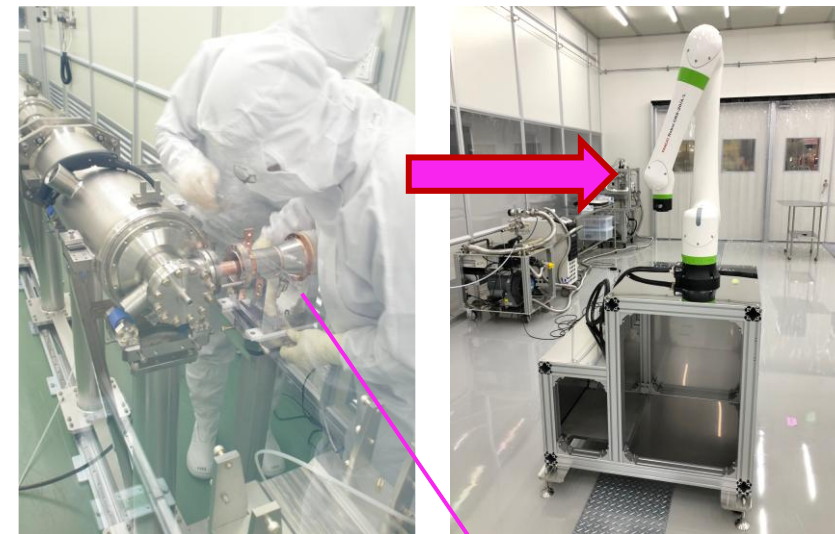
2024年度 COI棟でCMモジュールの開発を進めている。

① ILCタイプのクライオモジュール技術開発

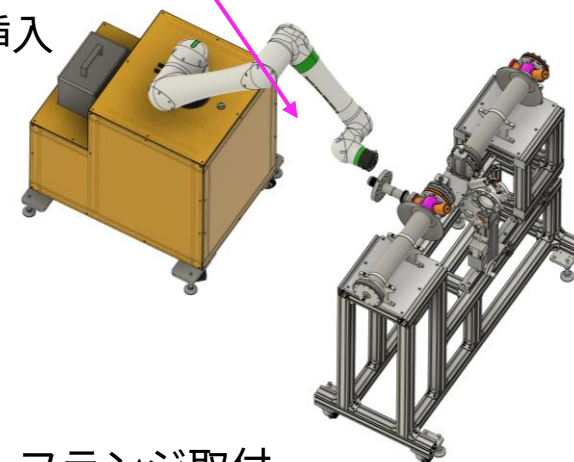


項目		2023	2024	2025	2026	2027
空洞	製造	←→				
	単体試験		←→			
	LHeジャケット溶接				↔	
CM* 付属品	周波数チューナー					
	RFカップラー	←→				
	磁気シールド	←→				
	超伝導磁石+BPM	←→				
CM*	製造		←→			
	組立				↔	
	モジュール試験					↔

CM組立時に協働ロボットの利用を検討中

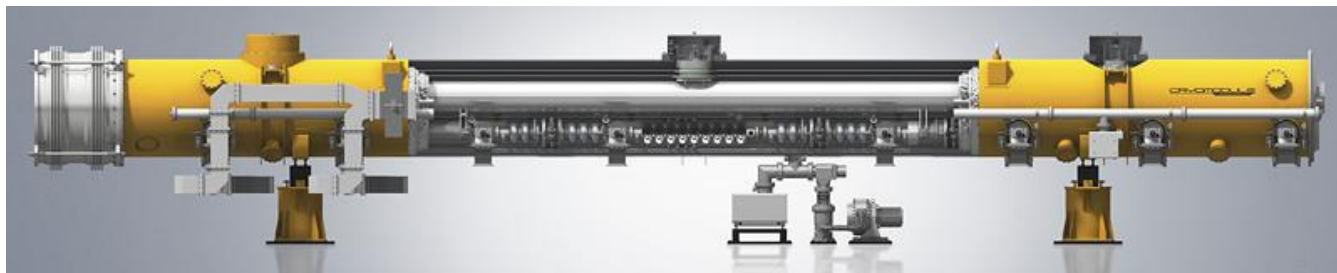


カップラー挿入



フランジ取付

CM = Cryomodule



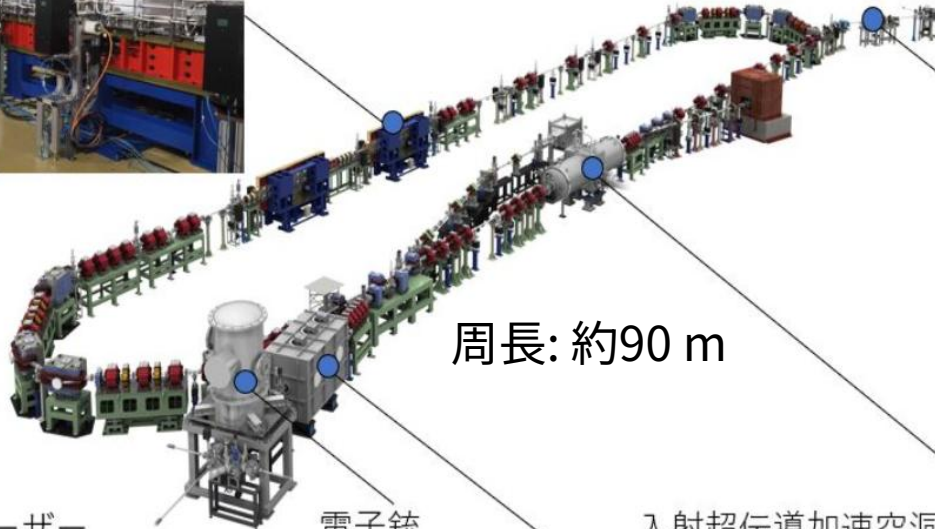
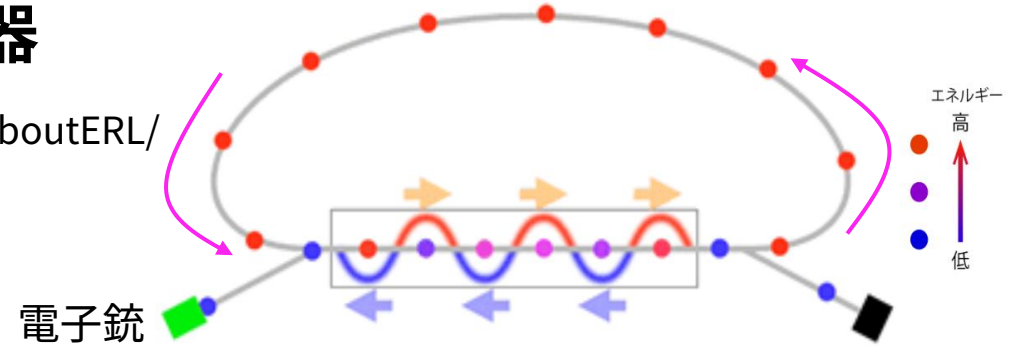
② compact ERL加速器における半導体製造向け EUV-FEL光源技術開発



compact Energy Recovery Linac (ERL) 加速器

アンジュレータ

<https://www2.kek.jp/casa/cERL/ja/intro/aboutERL/>



周長: 約90 m

電子銃

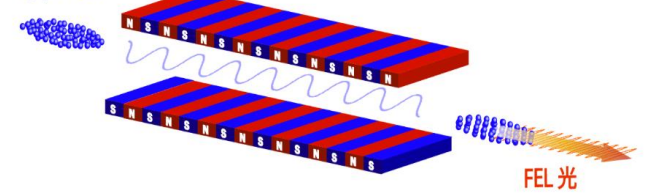
照射ビームライン



周回してきた電子からエネルギーをSRF空洞に回収し、電子銃から入射した新しい電子の加速に利用

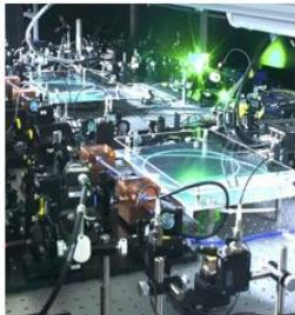
アンジュレータ

電子バンチ



FEL光

電子銃レーザー



電子銃



入射超伝導加速空洞



主超伝導加速空洞



電子ビームは曲げられるときに放射光を出す。アンジュレータ内で発生した光と電子を相互作用させることで強くコヒーレントな光源となる。

② compact ERL加速器における半導体製造向け EUV-FEL光源技術開発



◆さらなる半導体の微細化にはEUV光の高出力化が重要：～kWクラス

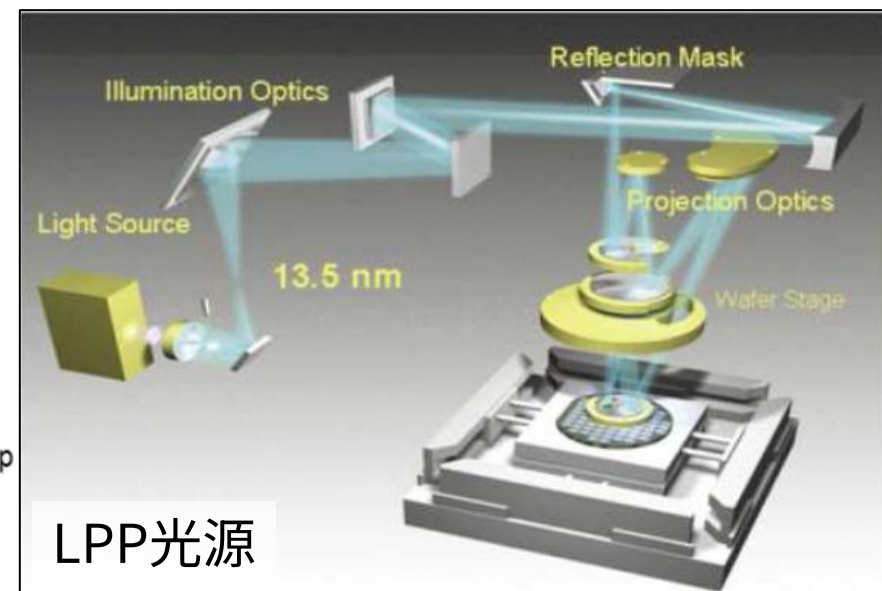
◆現在はLPP (Laser Produced Plasma)光源が主流
強度は数百Wレベル、kWクラスにはBreakthroughが必要

◆KEK-iCASAでは、ERL技術を適用した
EUV-FEL光源を提案

➤10 kWのEUV光出力可能

➤LPPに比べ省電力

Norio Nakamura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 62 SG0809 (2023)



- K Program（経済安全保障重要技術育成プログラム）に採択
- 今後5年間で、ERLベースのEUV-FEL技術実証を進める計画

③ 次世代Nb₃Sn小型超伝導加速器技術開発



◆ここまで紹介した超伝導空洞は、すべて純Nb製で液体ヘリウムにより冷却
実は、その陰には様々なハードルが存在↓

<https://www.khk.or.jp/>



ヘリウム液化設備



ヘリウムガス貯蔵設備



CM構造が複雑で、コスト高



高圧ガス保安法準拠

◆液体ヘリウムから脱却することで、**超伝導空洞のすそ野を広げたい**

- 液体ヘリウム無しで冷却 → **4K小型冷凍機** (ただし、冷凍能力貧弱)
- 4Kで低発熱 (高Q値) → **Nb₃Sn空洞** (T_c 18.3K)

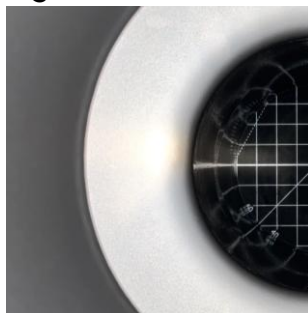
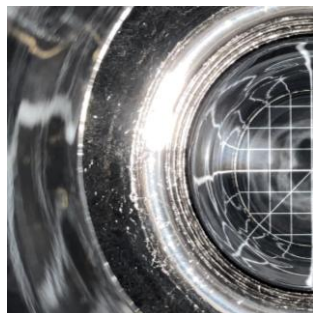
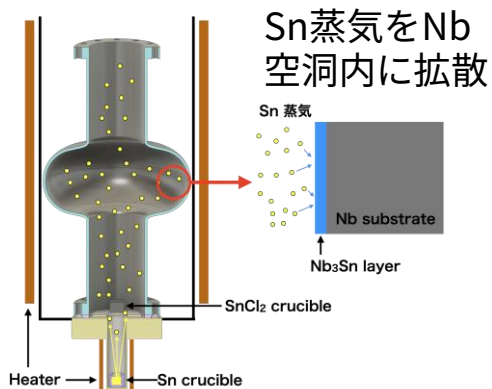
③ 次世代Nb₃Sn小型超伝導加速器技術開発



◆ Nb₃Sn成膜研究

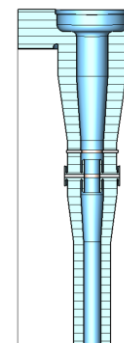
(東北大院生参加)

Nb空洞 Nb₃Sn膜 on Nb空洞

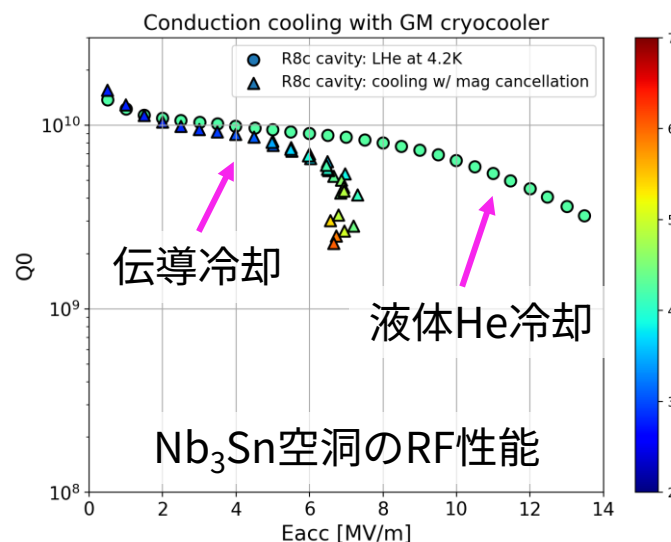
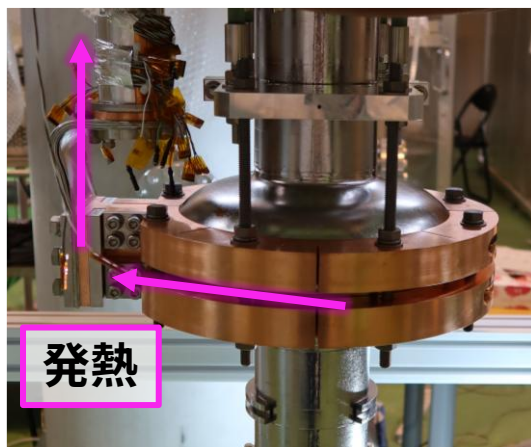
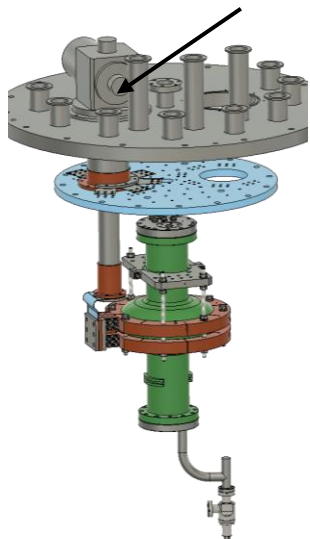


◆ 100kWクラス入力カップラー開発

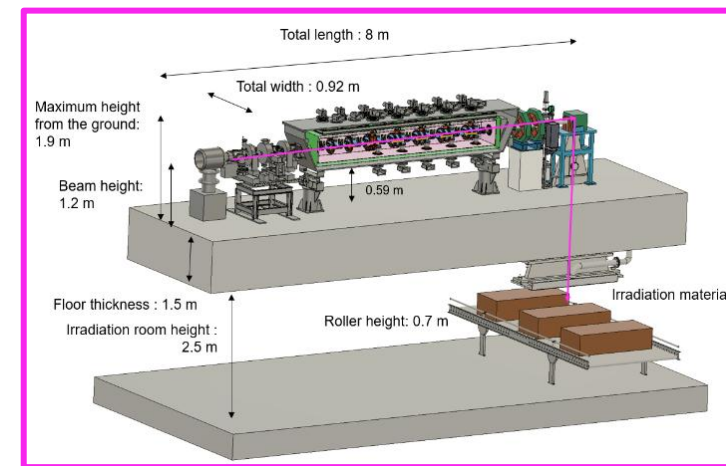
(総研大院生主導)



◆ 小型冷凍機による伝導冷却研究 (総研大院生参加)



10MeV 50mA Nb₃Sn照射用加速器を提案



H Sakai et al 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2687 092013(IPAC23)



◆超伝導高周波加速空洞 = Superconducting RF accelerating cavity → SRF空洞

- 概要
- 製造方法
- 表面処理、性能評価、最近の研究

◆iCASAで展開するSRF加速器技術開発

- ① ILCタイプのクライオモジュール技術開発
- ② compact ERL加速器における半導体製造向けEUV-FEL光源技術開発
- ③ 次世代Nb₃Sn小型超伝導加速器技術開発

◆まとめ

まとめ



- 超伝導加速空洞は、超伝導という特徴により高いQ値を実現でき、投入したRF電力のほぼ100%をビーム加速に充てることができる。
- 良い空洞性能は、欠陥が無く、平滑な表面で、適切な表面処理が行われ、空洞内へ塵の混入が無く、磁場等を抑えた環境で、達成することができる。さらなる空洞性能向上に向けた研究も行われている。
- KEK-iCASAでは超伝導加速空洞の開発だけでなく、その利用も推進している。
 - ILCタイプのクライオモジュール技術開発
 - compact ERL加速器における半導体製造向けEUV-FEL光源技術開発
 - 次世代Nb3Sn小型超伝導加速器技術開発
- KEK-iCASAでは超伝導空洞とその周辺技術に興味のある**大学院生を募集中!**
- 施設見学も随時対応します。気軽にご連絡ください。(山田: ytomohi@post.kek.jp)
- 4月26日締切の助教公募が出ています。

Acknowledgements

Courtesy: H. Sakai



- This work was supported by “MEXT Development of key element technologies to improve the performance of future accelerators Program”, Japan Grant Number JPMXP1423812204
- The irradiation beamline, target system and extra shieldings are fully supported by Accelerator Inc. and all these R&D are done under the consignment contract.
- The radioisotope generations are the joint research with Chiyoda Technol Corporation.
- FEL production work is based on the results obtained from NEDO project "Development of advanced laser processing with intelligence based high-brightness and high-efficiency laser technologies (TACMI project).“
- Nanocellulose production experiment of cERL is based on the results obtained from NEDO project of “Development of innovative quantum beam technology for high-efficiency nanocellulose production”
- THz development work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 18H03473.
- We would like to express our gratitude to all members of safety-shift under cryo and beam operation.



iCASA members (+α) (2024.May)