



# KEKにおける超伝導加速空洞を用いた クライオモジュールの製造

Production of cryomodule with SRF cavities at KEK

高エネルギー加速器研究機構  
応用超伝導イノベーションセンター

**道前 武**

第22回日本加速器学会年会  
2025年8月8日

# 共著



## 高エネルギー加速器研究機構

荒木 隼人 有本 靖 井藤 隼人 Viklund Eric 植木 竜一 梅森 健成  
Omet Mathieu 片山 領 久保 毅幸 Kumar Ashish 結束 汐織 佐伯 学行  
阪井 寛志 清水 洋孝 Shanab Safwan 中西 功太 Bajpai Rishabh 原 和文  
原 隆文 本間 輝也 松本 利広 山田 智宏 山本 康史

## 謝辞

Fermilab: S. Belomestnykh, G. Wu, C. Grimm, Y. Orlov

DESY: H. Weise, D. Reschke, D. Kostin

JLab: Roger Ruber

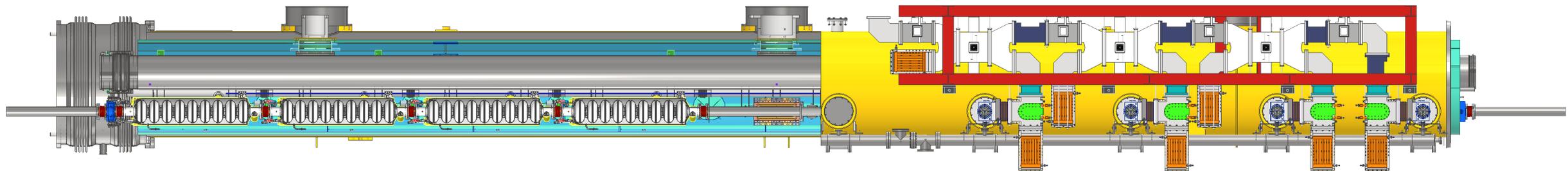
本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業JPMXP1423812204の助成を受けたものです。

# 目次



1. 背景
2. クライオモジュールの説明
3. 各コンポーネントの紹介と現状
4. まとめ

製造中のクライオモジュールのモデル





# 1. 背景

# International Linear Collider (ILC) 計画



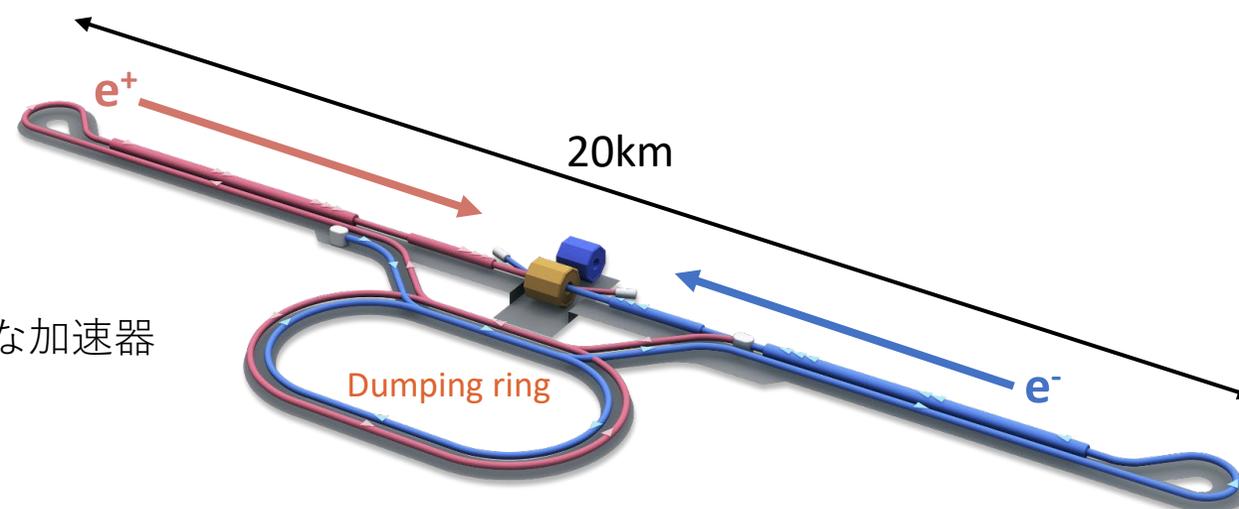
Higgs粒子の精密測定を目的とした**グローバルな**加速器実験。  
電子・陽電子をそれぞれ125GeVまで加速して衝突させる。  
超伝導加速空洞を用いた線形加速器で粒子を加速する。

## 主な利点

- 直線なので放射光ロスなしで加速出来る  
円形加速器で同じエネルギーを実現するためには、巨大な加速器が必要となってしまう。(莫大な建設費がかかる。)
- 将来エネルギーを上げるために延長することが可能。

## 現時点での課題

- 極限まで絞ったビームサイズの実現。
- 大量の電子・陽電子の生成。
- 衝突後の高エネルギー大電流ビームのダンプ
- 高加速勾配 + 高Q値を持つ超伝導加速空洞を歩留まり良く9000台製造する。**



©:Rey.Hori/KEK

## ILC加速器の主な仕様

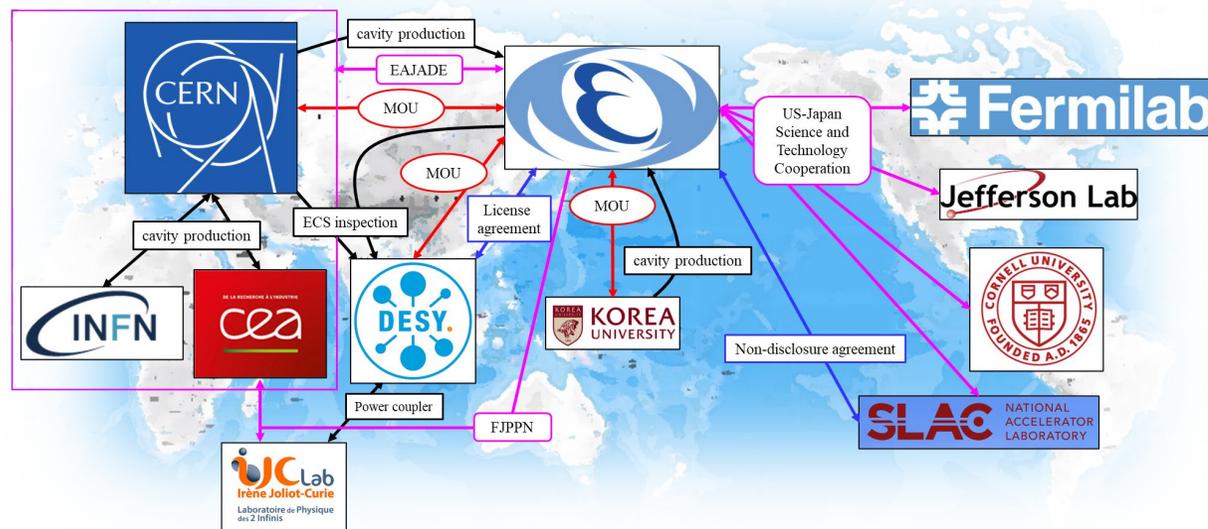
Beam Energy	<b>125 + 125 GeV</b>
Luminosity	$1.35 \times 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s}$
Beam rep. rate	5 Hz
Pulse duration	0.727 ms
# bunch / pulse	1312
Beam Current	5.8 mA
RMS beam size at IP (X/Y)	516 nm / 7.7 nm
SRF Field gradient	$< 31.5 > \text{ MV/m (+/-20\%)}$ $Q_0 = 1 \times 10^{10}$
#SRF 9-cell cavities (CM)	<b>~ 8,000</b>

# 本開発の枠組み



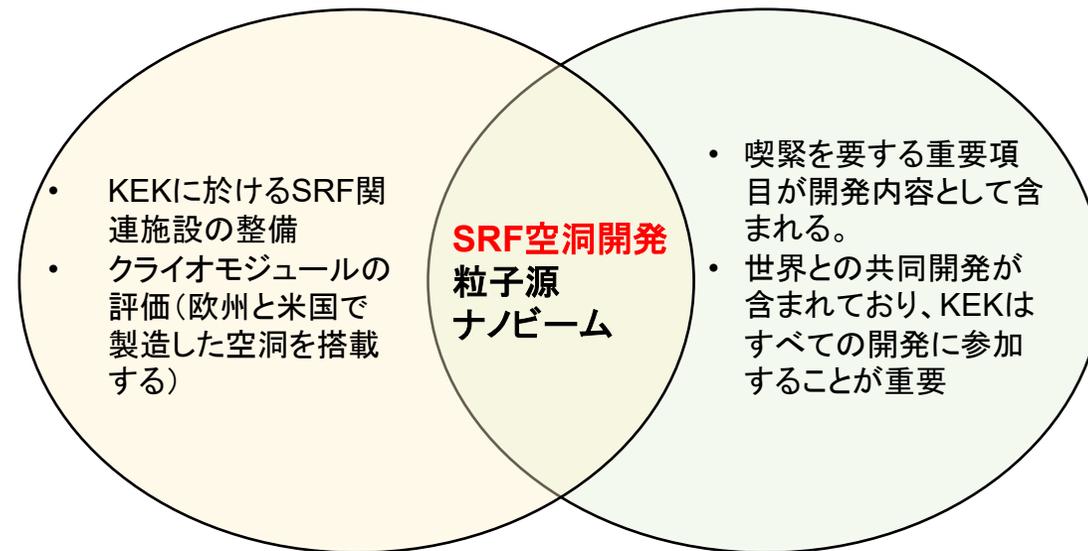
- 2023年度から5カ年の計画で文科省補助金事業に依る「**将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発**」が始まった。(MEXT-ATDプログラム)  
→本事業では主にナノビーム収束技術開発、粒子発生技術開発、**超伝導加速空洞技術開発**に取り組む。
  - 現在、**ILC Technology Network (ITN)** と呼ばれる国際コラボレーションプログラムが進んでいる。  
→ILCはグローバルな実験であるため、本研究も海外の研究所と協力して進めていく。
- ※ITNに関してはFRO710「KEKでのITN (ILC Technology Network)の下での加速器開発の現状」 阪井寛志を参照

ITNに於ける協力構造



MEXT-ATD

ITN



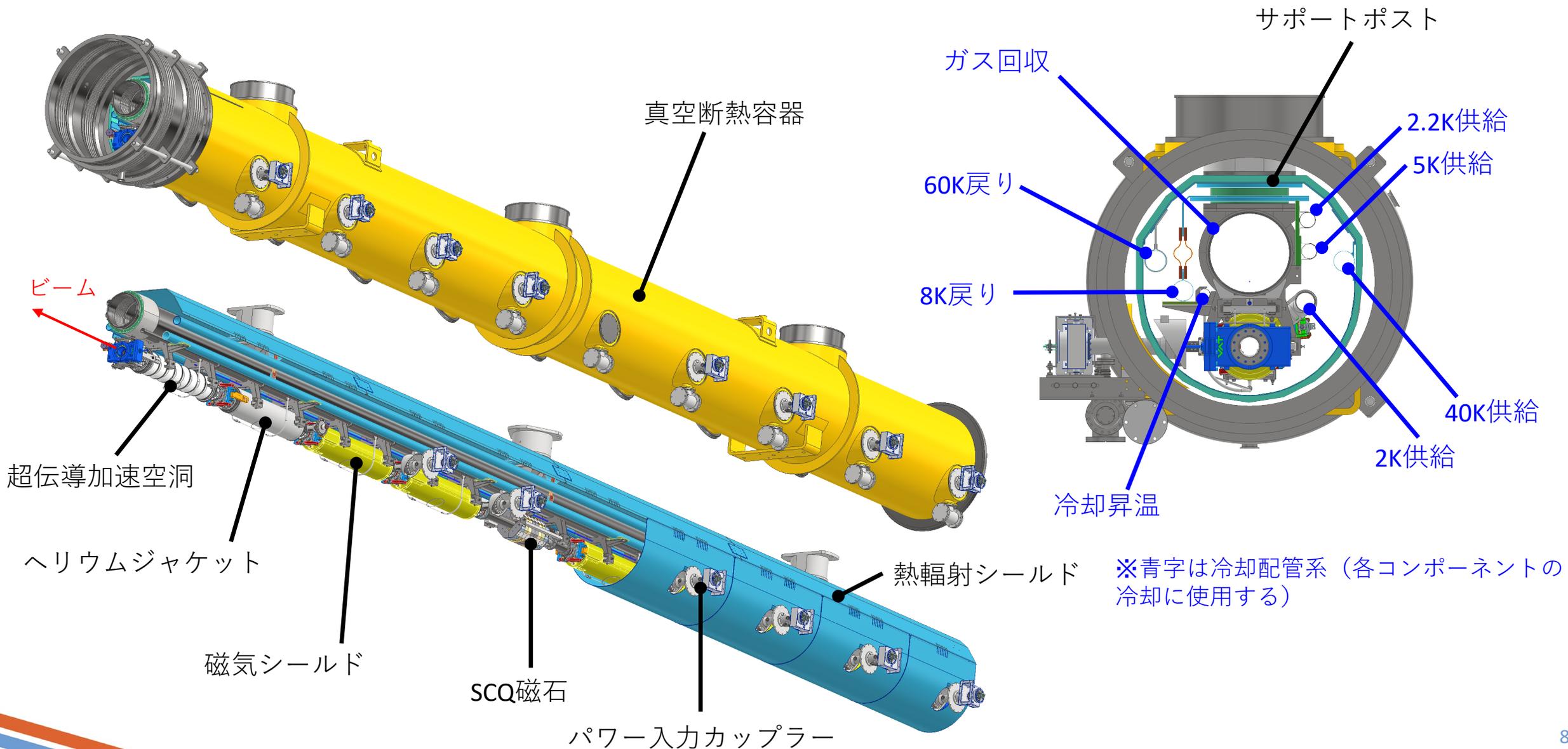
**本研究の目的**

**8台 (+α) の空洞を製造し性能評価を行った上で、クライオモジュールに組み込んで冷却試験を行う。**



## 2. クライオモジュールの説明

# Cryomoduleの主なコンポーネント

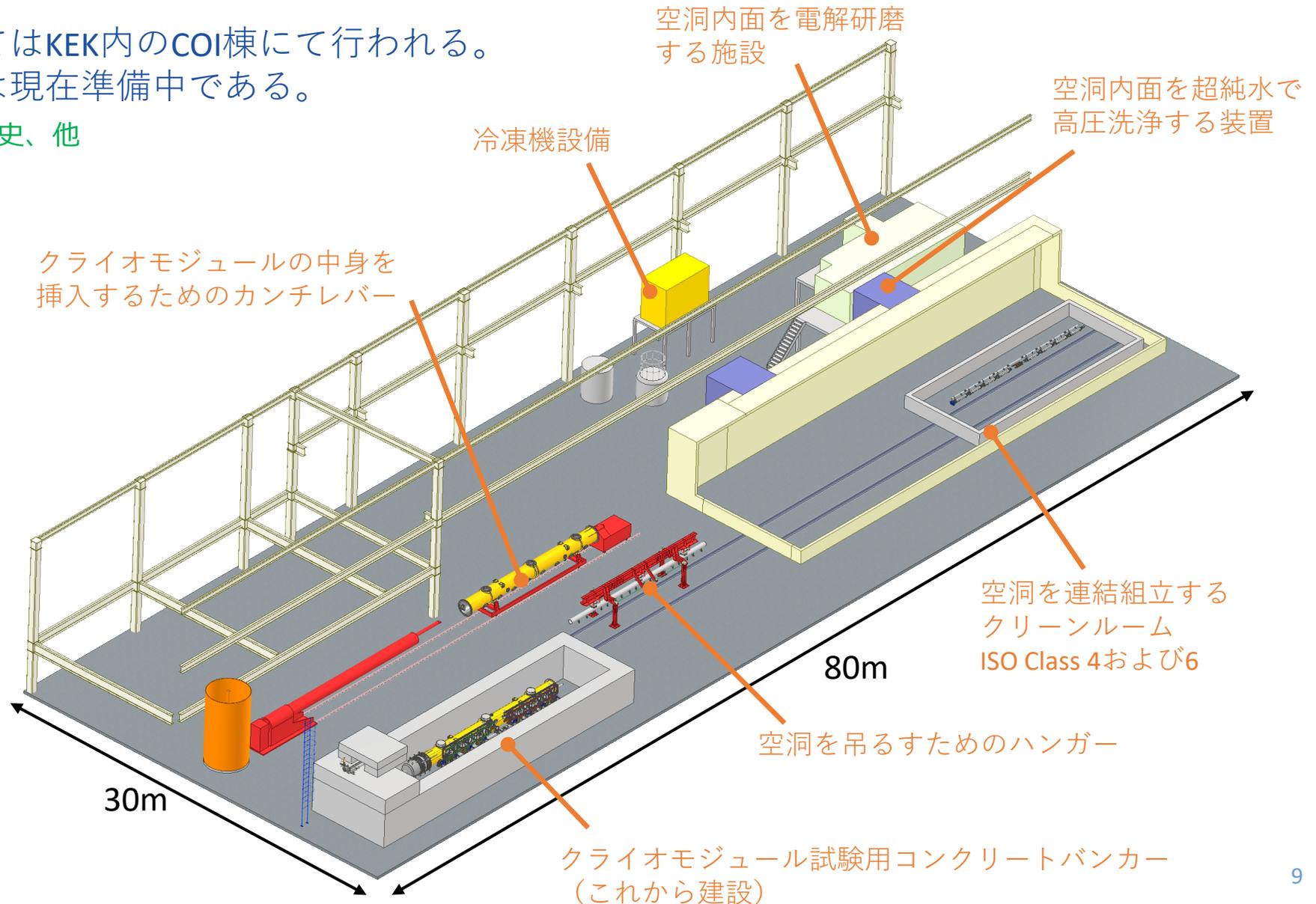


# COI棟での組み立て

クライオモジュールの組み立てはKEK内のCOI棟にて行われる。  
組立に必要な一部の設備は現在準備中である。

WHP014「STF/COI施設報告」山本 康史、他

現在のCOI棟の状況



# 製造スケジュール



本研究では2027年度中にクライオモジュールを完成させ、冷却試験を実施する予定である。

## Overall production schedule of 5-year plan @Mar/2025

		JFY2023				JFY2024				JFY2025				JFY2026				JFY2027				
		CY2023		CY2024		CY2025		CY2026		CY2027		CY2028										
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Cavity	9-cell FG	1 (prototype)			2				1													
	9-cell MG			1 (prototype) + 1				1														
	9-cell FG (oversea)			press test for MG				2														
	VT for recipe establishment																					
	VT for success yield																					
	Helium tank wedling																					
Ancillaries	Power coupler																					
	Frequency tuner																					
	SCQ magnet+BPM																					
	Magnetic shield																					
Cryomodule	CM production																					
	CM assembly																					
	CM test ① w/ low power																					
	CM test ② w/ high power																					

現在

# Cryomodule仕様



基本的なデザインは過去に作られたILCの技術設計書に基づいている。  
そこから製造コスト削減や性能向上を目指した変更を加えている。  
(変更には、他研究所での研究結果なども取り入れている。)

**Cryomoduleは液体ヘリウムを用いて運転するため、高圧ガス保安法に準拠して製造する必要がある。**

## 主な変更点

- 2重だった輻射シールドを1重に変更。※1
- 冷却配管をJIS規格に則ったサイズに変更。
- 導波管を先に組み上げてからクライオモジュールに装着する方法に変更。  
※1、2
- SCQ磁石を伝導冷却タイプに変更し、後からビームパイプに装着できるよう、縦分割のタイプに変更。(後述)
- 周波数チューナーの形状を変更。

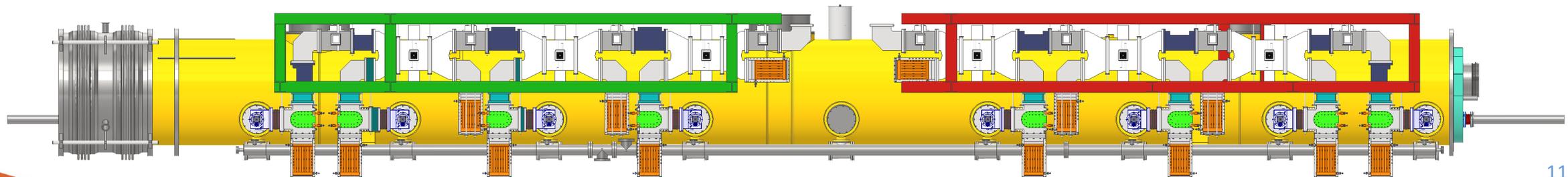
※1 THP001「KEKにおける超伝導加速空洞を用いたクライオモジュールの設計検討」原 隆文、他

※2 WEP068「KEKにおけるITN(ILC Technology Network)クライオモジュール試験用RF電力分配系」松本 利広、他

クライオモジュールの主な仕様

Number of cavities	8
Magnet	SC magnets (and BPM)
Vacuum vessel length	12,652 m
Vacuum vessel diameter	OD965mm, ID946mm
Coupler pitch distance	1326.7 mm
Cavity length	1247.4 mm

組みあがった導波管を装着したクライオモジュール





# 3. 各コンポーネントの紹介と 現在の状況

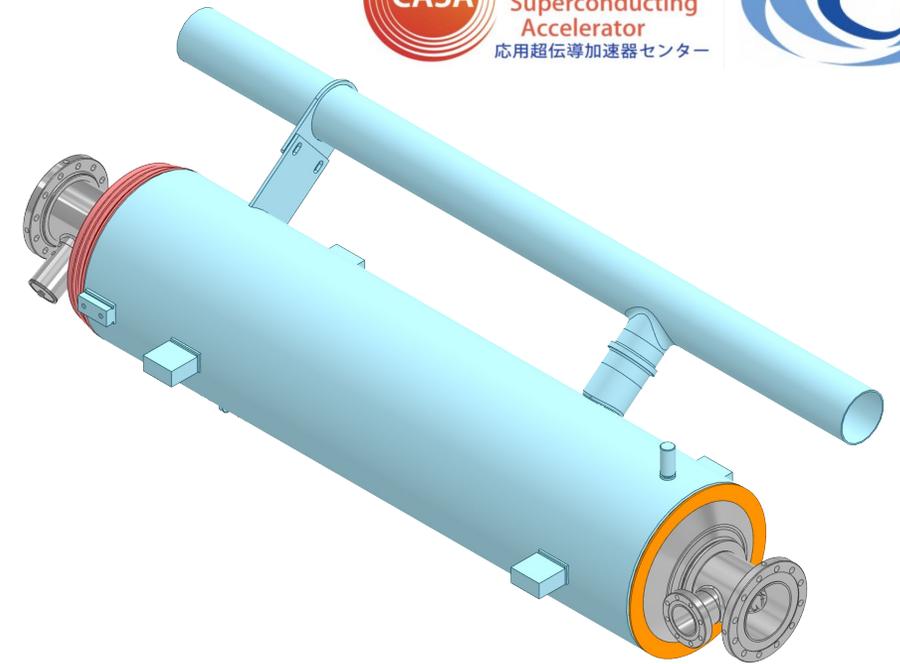
# 超伝導加速空洞

空洞形状は世界で使用されているTESLA形状を採用する。  
KEKでの内作で6本、海外メーカーで2本製造する予定。（+欧州による製造）

**空洞は高圧ガス容器であるため、高圧ガス保安法に準拠する必要がある。**

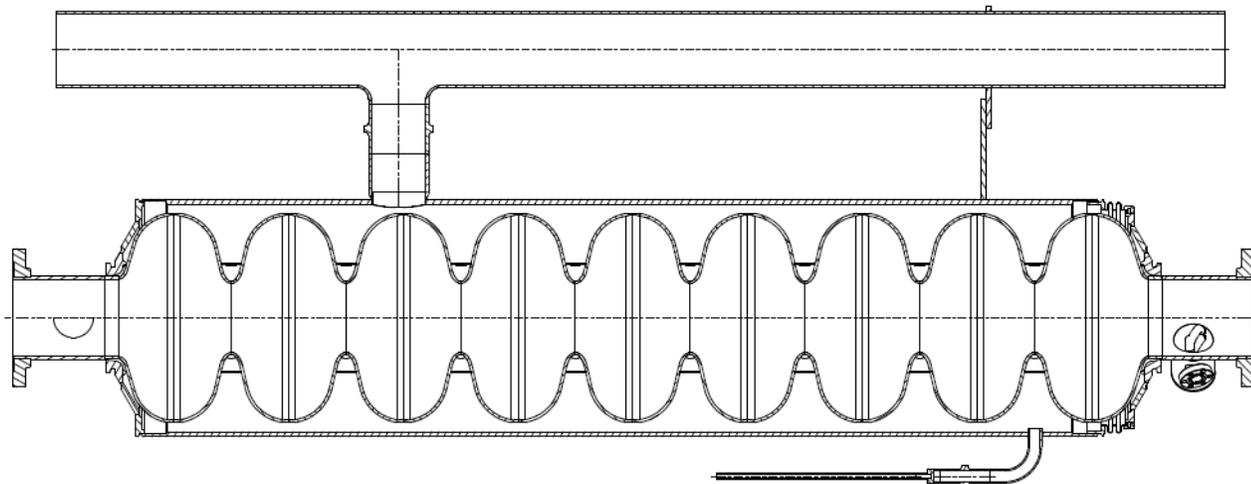
- ニオブやニオブチタンなどは材料の規定がない
- 形状が特殊である
- 使用温度が基準のない極低温である

上記理由から、自分達で安全を担保する方法を検討し、あらかじめ申請し審査を受けておく必要がある（事前申請）



超伝導加速空洞の主な仕様

$E_{acc}$ (qualification)	35 MV/m ( $\pm 20\%$ )
$Q_0$ @35 MV/m (qualification)	$1.0 \times 10^{10}$
$E_{acc}$ (operation)	31.5 MV/m ( $\pm 20\%$ )
$Q_0$ @31.5 MV/m (operation)	$1.0 \times 10^{10}$
Operation Frequency	1.3 GHz
Cavity length	1247.4 mm
Yield ratio	$\geq 90\%$



# 空洞の表面処理



空洞の高Q値、高加速勾配を目指し2-step bakingと呼ばれる熱処理を行う。  
9セル空洞の処理に先立ち、単セル空洞を使い、2-step baking処理を行った空洞の性能評価を行う。

## 空洞の表面処理工程

1. 電解研磨 1 (150 $\mu$ m)
2. アニール (900 $^{\circ}$ C $\times$ 3時間)
3. 電解研磨 2 (Cold EP、20 $\mu$ m)
4. 高圧純水洗浄および組立
5. **2-step baking (75 $^{\circ}$ C $\times$ 4時間 + 120 $^{\circ}$ C $\times$ 48時間)**

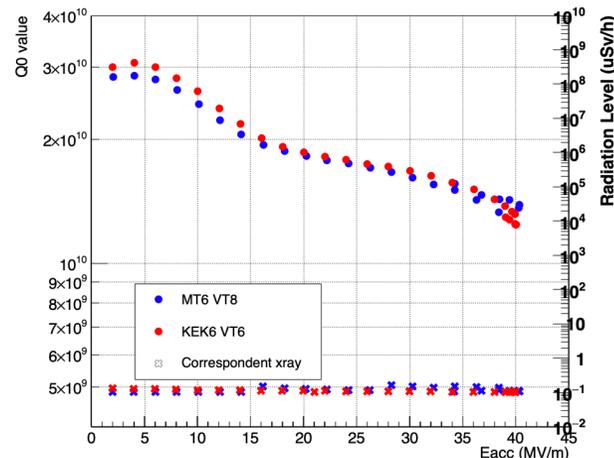
2-step baking用  
クリーンオープン



性能確認のために製造された単セル空洞



2-step baking処理をした空洞の性能



# 新しい材料 (MG材) を用いた空洞



空洞の材料コストを下げるために新しい材料を用いた空洞製造も進んでいる。  
新しい材料を用いて単セル空洞はすでに4台製造しており、いずれもILC要求を満たす性能が出ている。  
CMに入れる空洞のうち、数台は新材料を用いた空洞となる予定。

溶解



ニオブインゴット

鍛造



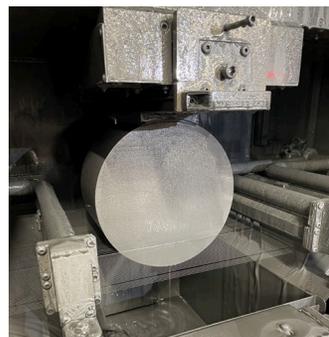
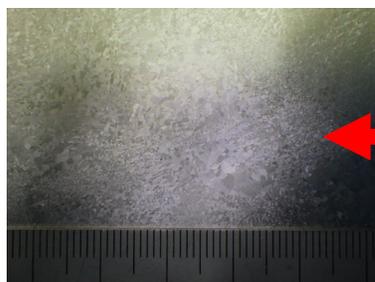
圧延



Fine Grain (FG) Nb  
(通常使うシート)



Medium Grain (MG) Nb



2025年6月には世界初となるMG材を用いた9セル空洞が完成した。



鍛造工程を経ているので結晶粒径も小さく成型後の歪みが小さい。  
機械特性も比較的、均一になっている。

# カップラー

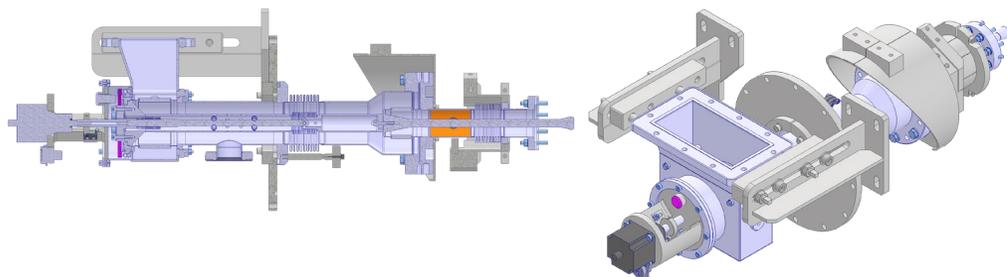


空洞にRFを入力する。  
European X-FELで使用されたモデルを踏襲する。

FRP052「KEKにおける文科省補助金による5カ年計画（MEXT-ATD）のためのEuropean XFELタイプ入力結合器のクオリティチェック」山本 康史、他  
FRP053「KEKにおける文科省補助金による5カ年計画（MEXT-ATD）のためのEuropean XFELタイプ入力結合器の製造とハイパワー試験の準備」山本 康史、他

現在の状況：

- 4台のカップラーの製造が2024年度に完了。製造したカップラーの組み立て作業が進行中。
- 製造中には、セラミックのロウ付け部分の強度試験を実施した。
- 今年度、更に4台の製造を進める。



製造するカップラーの主な仕様

Operation pulse width	1.65 msec
Operation repetition rate	5Hz / 10Hz
Required RF power in operation	~400 kW
Number of windows	2

製造された4台のカップラー



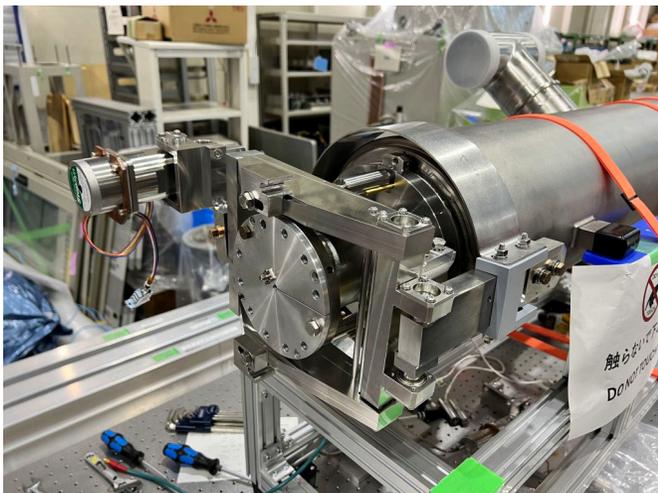
# チューナー

空洞の周波数を調整する。  
フェルミ研究所がデザインしたモデルに若干の変更を加えて使用する。  
低速度調整用モーターと高速度調整用ピエゾを使用する。  
チューニング範囲：モーターで600kHz（可動範囲は2mm）  
ピエゾで1.6kHz (@2K)

## 現在の状況：

- 1台のプロトタイプ機の製造・テストが完了。
- 真空・低温用モーターおよびピエゾの手配中。
- 低温でのピエゾおよびモーターの単体試験を実施中。
- 今年度にフレーム部分の製造も進める予定。

製造されたプロトタイプ



ピエゾの低温試験セットアップ



モーターの低温試験セットアップ

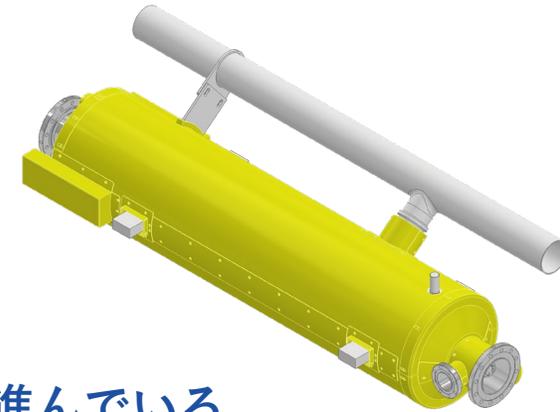


# 磁気シールド

空洞周辺の磁場が空洞性能に影響するため、磁気シールドで環境磁場を遮蔽する。  
材料は1.5mm厚のパーマロイを使用する。  
要求仕様：空洞部での残留磁場 < 10mG

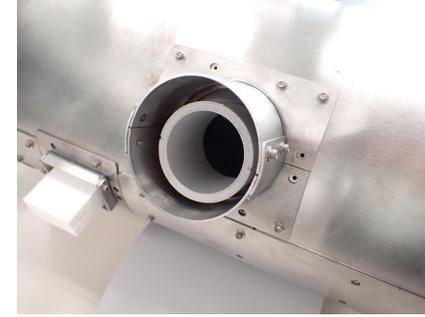
## 現在の状況：

- ステンレスを用いたモックアップを製造し、フィッティングチェックを行った。
- フィッティングチェックの結果を元に修正を加え、1台目のプロトタイプ機の製造が進んでいる。



空洞模型とのフィッティングチェックの様子

製造されたモックアップ



# SCQ磁石



2K冷却配管からの伝導冷却で冷却する。  
空洞やビームパイプを組立後に後から装着できるように2分割されている。

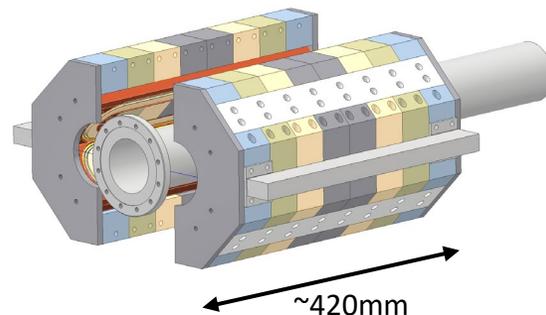
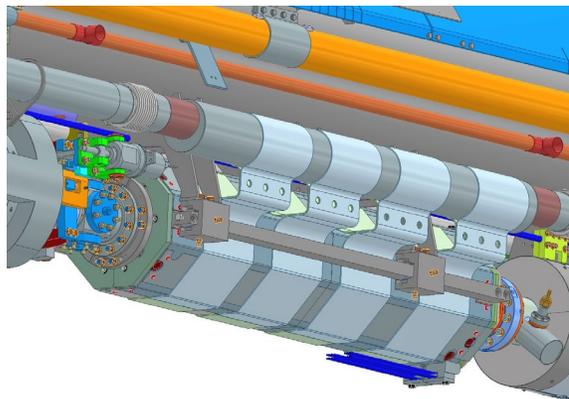
## 現在の状況：

- 3次元磁場シミュレーションを実施した。
- 単体試験用クライオスタットが完成し、冷却試験を実施中。
- マグネットの製造が完了。
- 本年度中にマグネットの伝導冷却・励磁試験を実施予定。

## SCQ磁石の主な仕様

Peak gradient	40 T/m
Peak integrated gradient	13.6 T
Peak operating quadrupole current	55 A

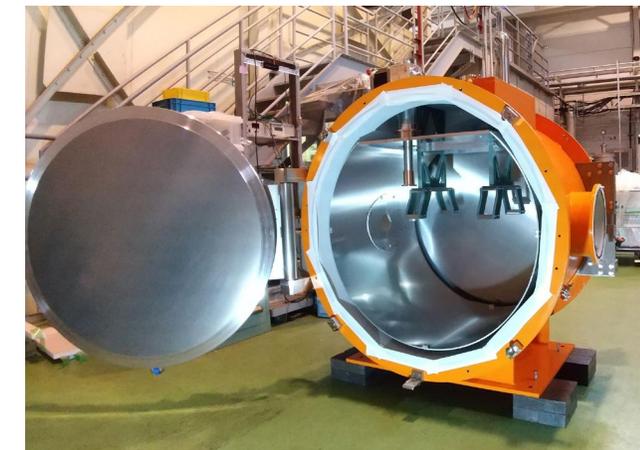
WEP072 「ILC主線形加速器用NbTi伝導冷却超伝導四極磁石の開発」 有本 靖、他



完成したマグネット



単体試験用クライオスタット



# その他のコンポーネント



## 冷凍機設備

ヘリウムの液化装置からクライオモジュールまでの輸送ラインを検討中。  
クライオモジュールに接続するコールドヘッドの設計を検討中。  
高圧ガス保安法への対応。

## クリーンルーム（空洞組み立て）

空洞連結時に使用する支持ポストのプロトタイプが完成。  
カップラー装着方法に関してCEA Saclayの技術者と情報交換を行った。  
組立手順確認用の空洞のモックアップを作成。  
クライオモジュールの両端に取り付けるゲートバルブの清浄度を確認中。  
FRP001「クライオモジュール製造に向けた極めて清浄な空洞連結作業の検討」井藤 隼人、他

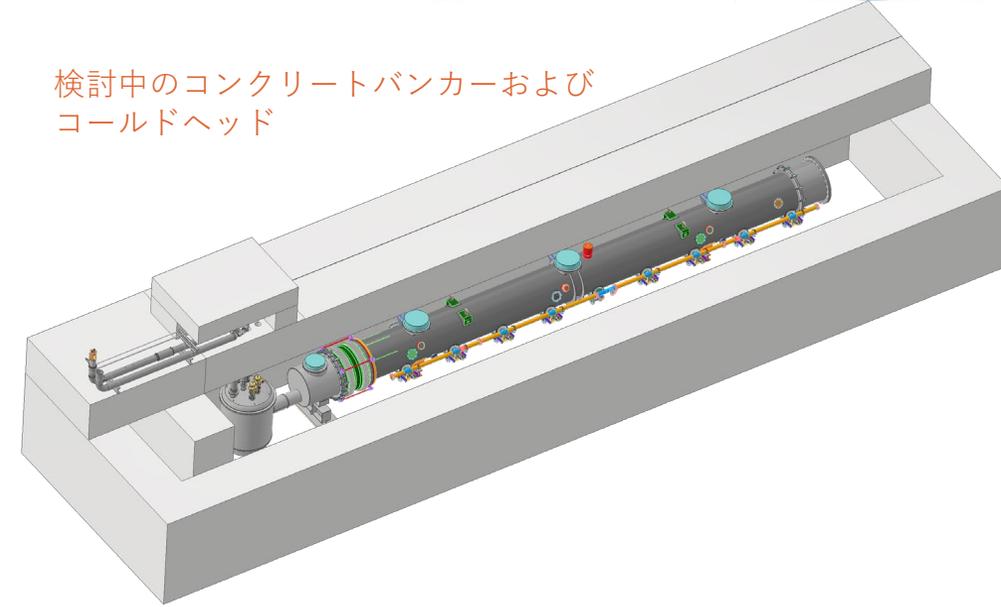
## RF

クライストロンはSTF棟（COI棟の隣にある建物）にあるものを使用する。  
STF棟からCOI棟まで導波管でRFを伝送する。伝送ラインは現在検討中。  
また、クライオモジュールに装着する導波管のデザインも現在検討が進んでいる。

## クライオモジュールテスト用コンクリートバンカー

クライオモジュールテストスタンドの周りをコンクリートシールドで囲む。  
現在は、放射線の遮蔽性能なども含め、デザインを検討している。

検討中のコンクリートバンカーおよび  
コールドヘッド



カップラー装着の練習



## 4. まとめ



現在、KEKではILC実現に向けた技術開発の一環として、超伝導加速空洞8台を搭載したクライオモジュールを製造中である。

- ベースデザインはILCの技術設計書を参考にしているが、一部変更を加えている。
- クライオモジュールは高圧ガス保安法に準拠して製造する。
- 各コンポーネントの準備（製造）が進んでいる。
- 2027年度末に冷却試験を行う予定である。