

重イオン線形加速器用 $\lambda/4$ 型超伝導空洞共振器 プロトタイプシステムの開発

- Introduction
- 超伝導空洞の設計と製作
- 超伝導空洞の単体性能試験
- 空洞以外の構成要素の製作と試験

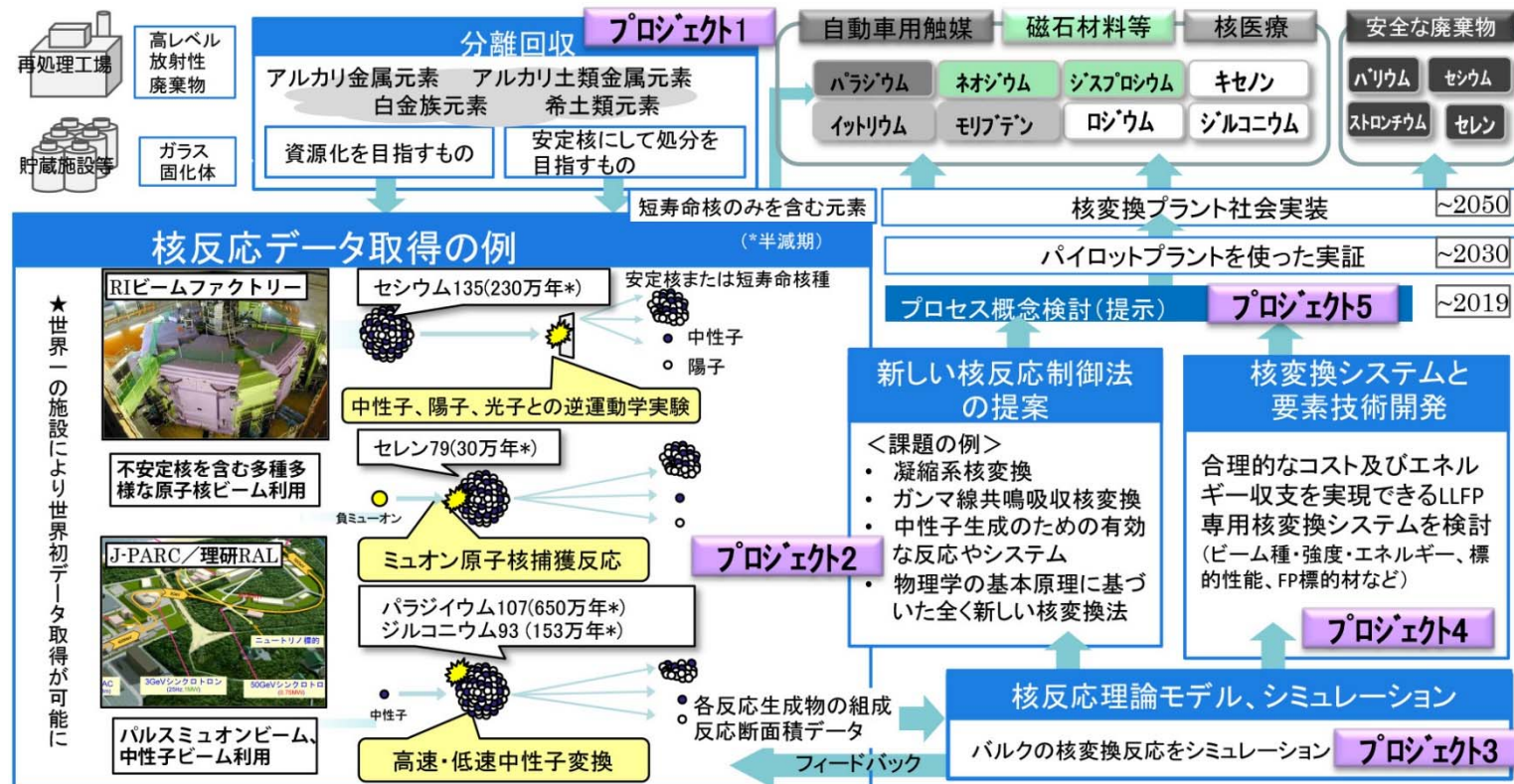
理研仁科センター加速器基盤研究部
山田 一成

開発の背景

ImPACTプログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」PM 藤田玲子 プロジェクト4: 核変換システムの検討と要素技術開発

➡ Low-β領域の大強度重イオン線形加速器のための要素技術開発として
N/4型超伝導空洞(SC-QWR)およびクライオモジュールの開発を行う(2015~)

長寿命核分裂生成物を加速器を用いて核変換して資源化するプロセスの概念を創出することが目標。偶奇分離された元素に、加速器からの大強度の高エネルギー中性子や陽子、重陽子ビームを照射して核変換することを想定している。必要なビームエネルギーと強度を実現するための加速器及び標的の技術開発課題を洗い出すとともに、必要な要素技術開発を行う。



プロトタイプシステムの概要

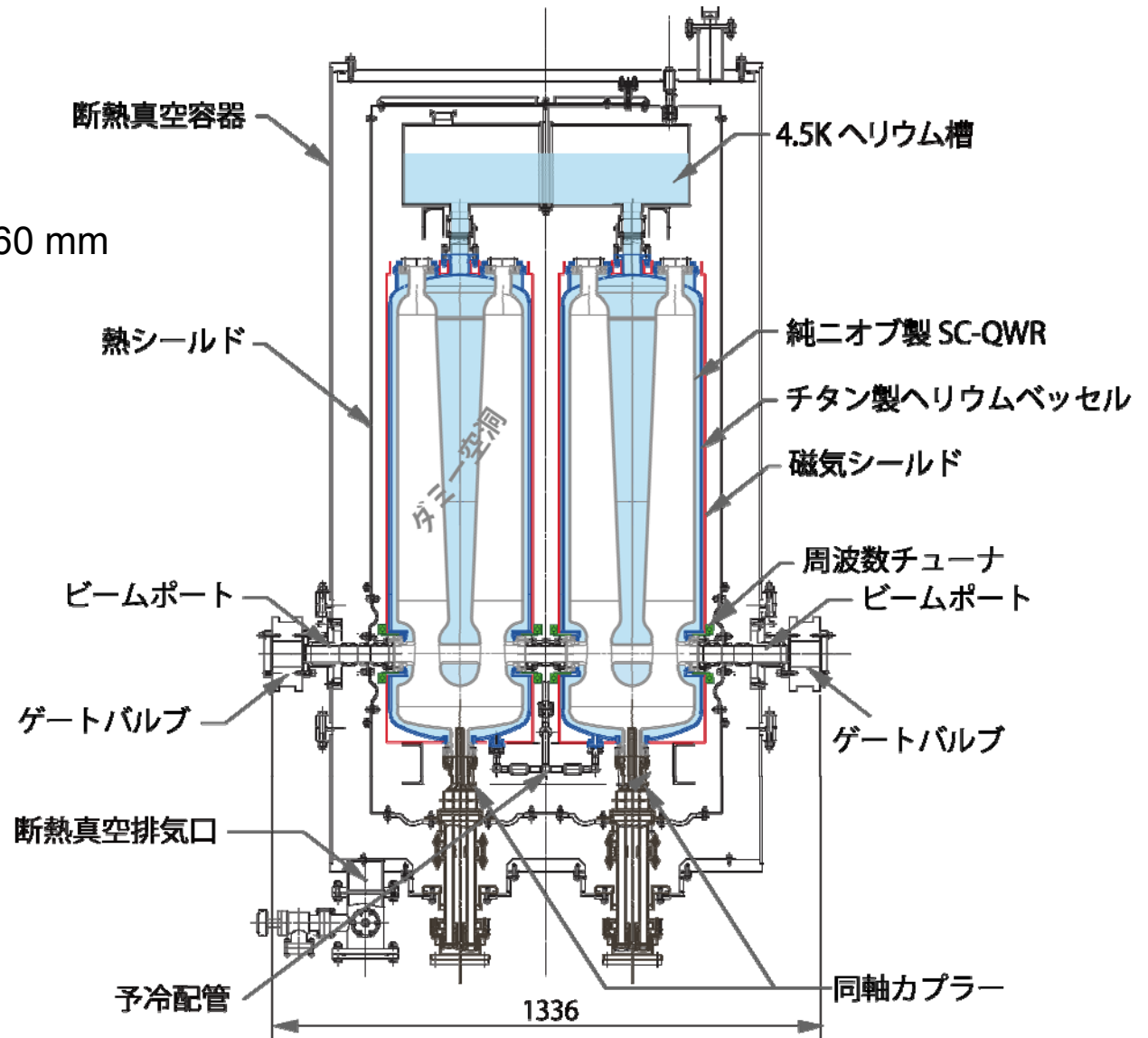
仕様

- ・加速粒子: >重陽子
- ・共振周波数: 75.5 MHz
- ・ギャップ電圧: >800 kV
- ・ギャップ中心間距離: $\beta\lambda/2 = 160 \text{ mm}$
 → $\beta_{\text{opt}} = 0.08$
- ・速度範囲: $\beta = 0.06 \sim 0.15$ 用

クライオモジュール 1式

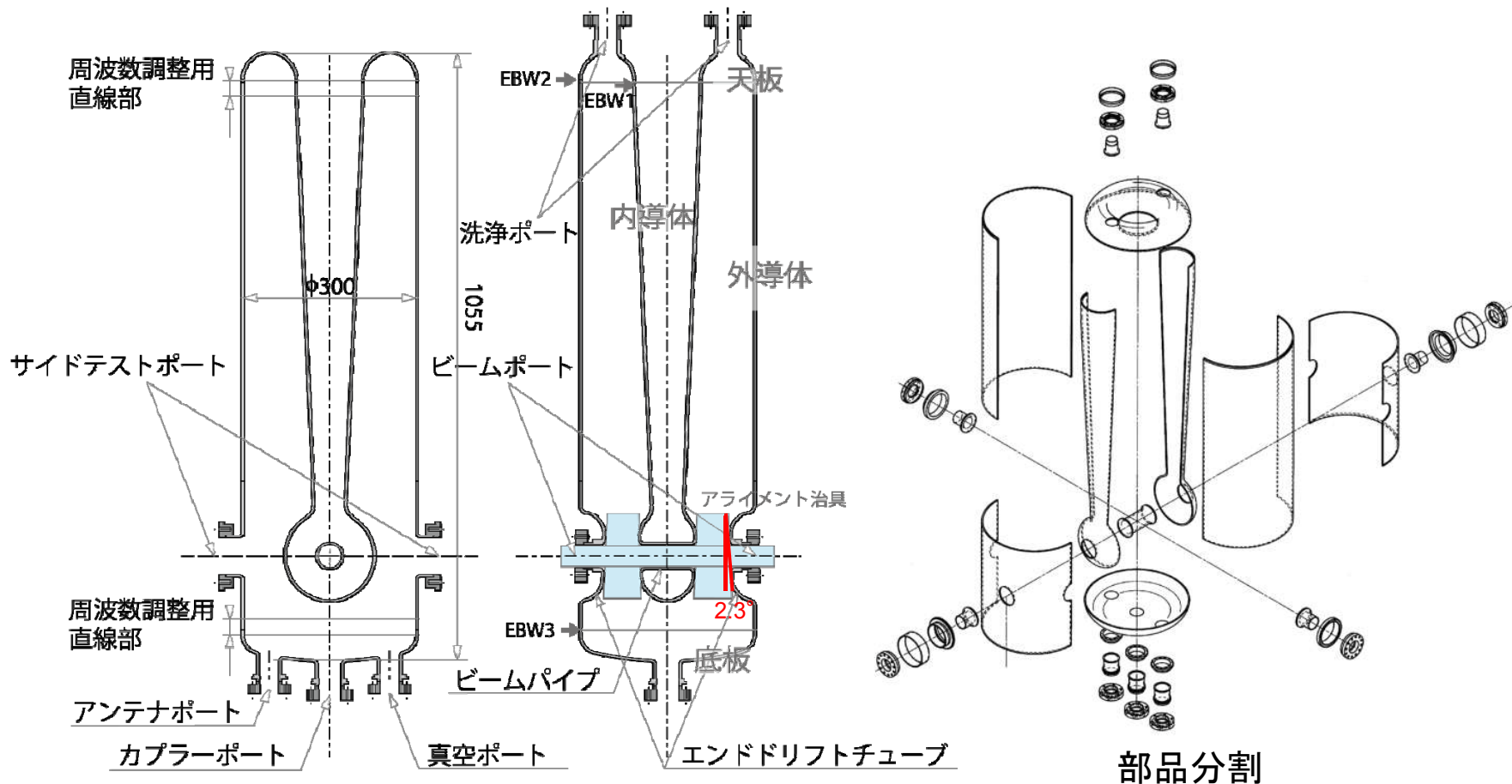
- ・SC-QWR 1式
- ・ダミー空洞 1式
- ・カップラー 2式
- ・チューナー 1式
- ・クライオスタット 1式

- ・2015年度設計
- ・2016年度製作



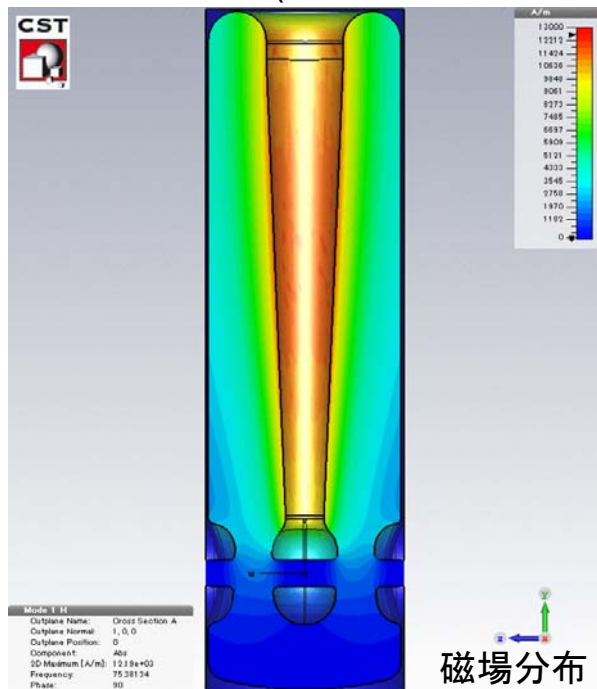
SC-QWRの概要

- ・バルクニオブ空洞、RRR = 250 純ニオブ材、4 mmt(東京電解)
- ・フランジはグレード2ニオブ材(ULVAC)、チタン製ヘリウムジャケット
- ・高圧ガス非対応(開放容器)
- ・天板、内導体、外導体、底板の4部品を製作してから組み立てる
- ・天板+内導体、外導体溶接部と外導体+底板溶接部に周波数調整用直線部を設けておく
- ・高周波磁場によるキック力を電場で補償(2.3° の面角)



SC-QWRの設計

空洞形状の決定(CST-MWSにて計算)



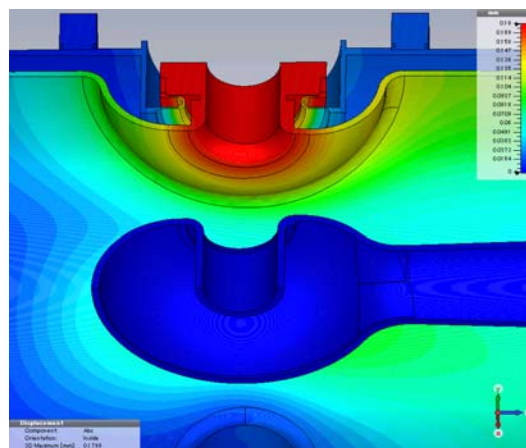
周波数チューニング機構 → ビームポートを押しつぶす方式

$\Delta f = 13.7 \text{ kHz}/0.3 \text{ mm}$ (ジャケット付)

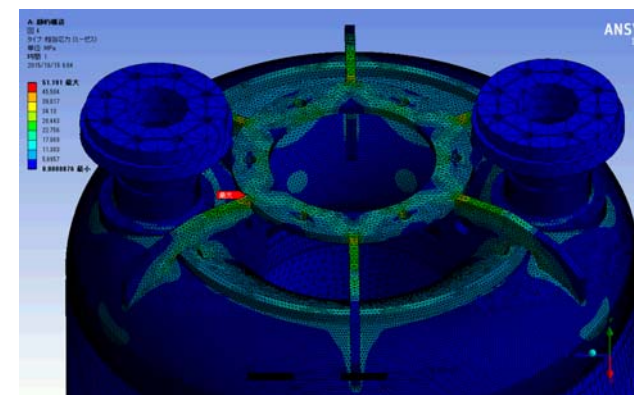
変形量、周波数変化量、応力の計算 (ANSYS、CST、ABAQUS)

最大応力を低減するように形状を最適化 → エンドリフトチューブ周辺

ビームポートパイプを5000 Nで押した場合の変形量



リブ構造と応力



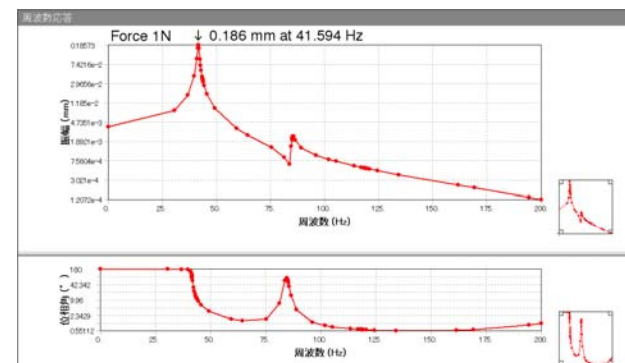
SC-QWR設計データ

Frequency [MHz] at 4.5 K	75.5
Duty [%]	100
β_{opt}	0.08
$G [\Omega]$	23.5
$R_{sh}/Q_0 [\Omega]$	578
Q_0	9.4×10^8
$P_0 [W]$	3.8
$V_{acc} [MV]$ at $E_{acc} = 4.5 \text{ MV/m}$, $\beta = 0.08$	1.44
$E_{acc} [MV/m]$	4.5
E_{peak}/E_{acc}	6.2
$B_{peak}/E_{acc} [mT/(MV/m)]$	9.7

$R_s = 25 \text{ n}\Omega$ として計算

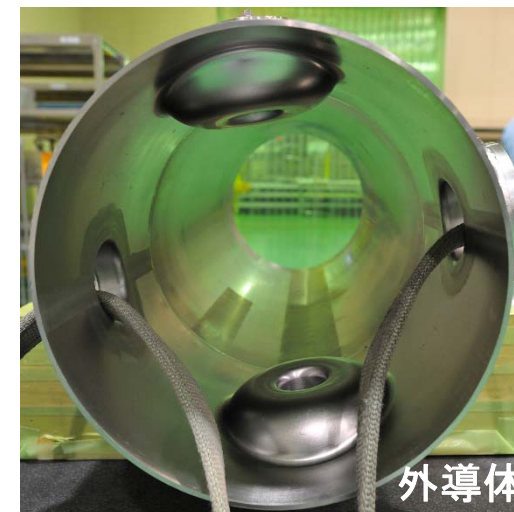
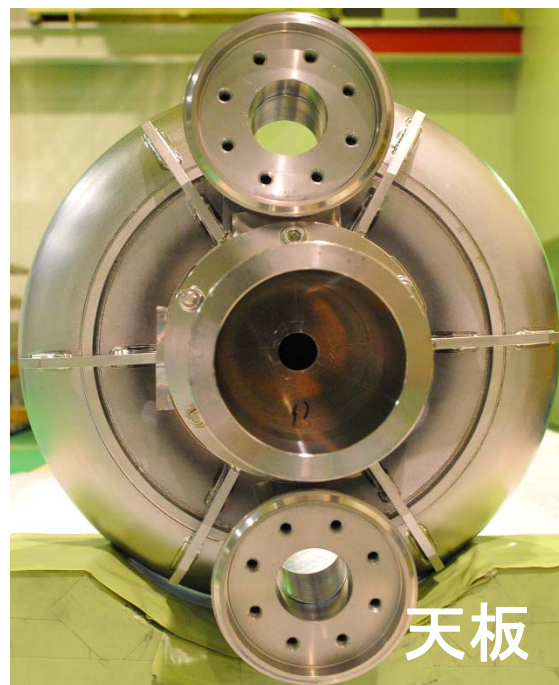
- ・純ニオブ許容引張応力: 26 MPa (常温)、75 MPa (-269°C)
 → -269°Cのみでチューナーを使用することにする
- ・天板のリブ構造を強化し、大気圧・ヘリウム圧力による変形の抑制と機械振動周波数の調整を行う
 → 6枚の縦リブ、円板、円周方向の2本のリブ

振動の周波数応答
 50 Hzは避けられている



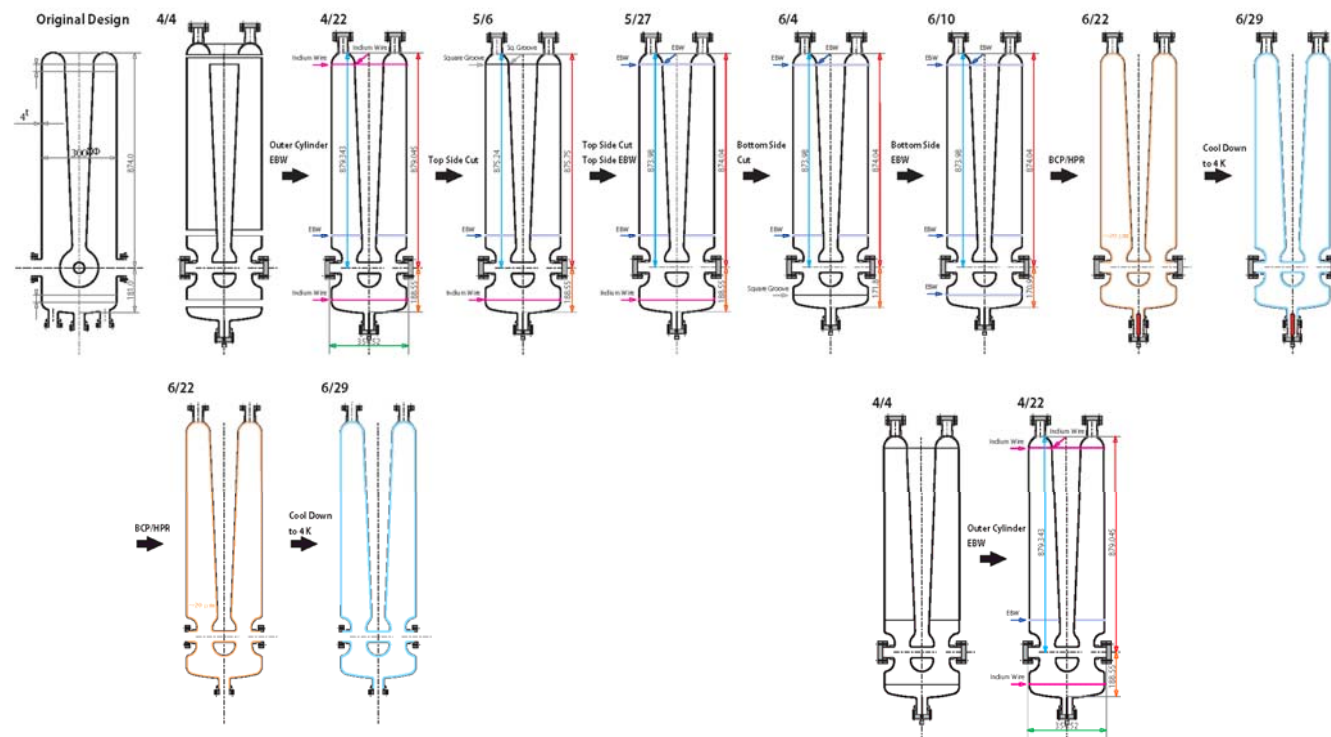
SC-QWRの部品製作

- ・部品を機械加工、プレス成形で製作
- ・組み合わせて電子ビーム溶接(EBW)を行い、内導体、天板、外導体、底板の4部品を製作



周波数測定と調整

- ・内導体、天板、外導体、底板を仮組みしてネットワークアナライザで周波数を測定し、カット量を決定して加工
- ・組み上げてEBW、周波数測定、加工を繰り返す
- ・各工程での周波数変化を測定しデータを蓄積、計算と比較
- ・最終的な共振周波数がチューナー調整範囲に入るかどうかを見極める



表面処理

標準的な表面処理工程を行う

- ・化学研磨(BCP) ~ 100 μm
- ・純水超音波洗浄
- ・真空熱処理(750°C 3h)



- ・BCP ~ 20 μm
- ・洗剤超音波洗浄
- ・純水洗浄

- ・超純水高圧洗浄 (HPR)
6 MPa, 6 L/min

BCP液
フッ酸:硝酸:リン酸 = 1:1:2

- ・真空引き
- ・リークチェック
- ・ベーキング(120°C 48h)

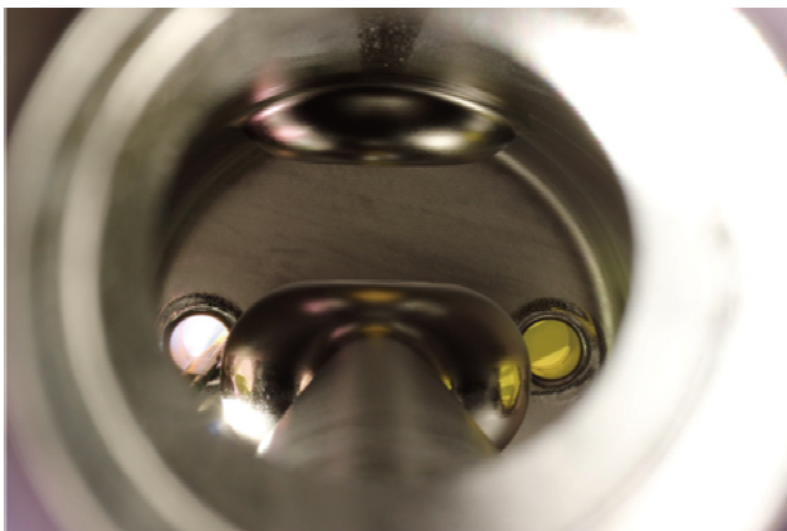
・クリーンルーム組立



- ・各プロセスでの周波数変化を測定
- ・BCPは1.0~1.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ の研磨速度
- ・BCPの周波数変化 +0.19 kHz/ μm
- ・BCP前後に内面観察を行う
(表面欠陥、異物付着)

内面観察(BCP後)

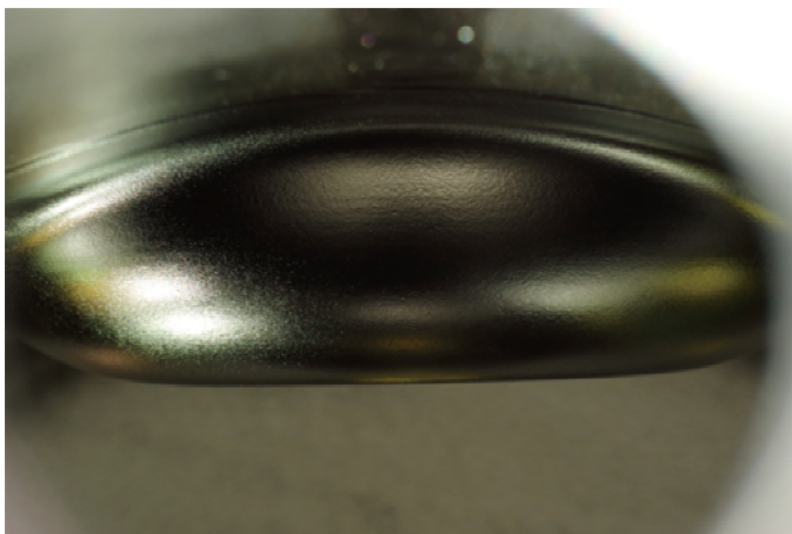
洗浄ポートから見た内導体



洗浄ポート内側



エンドドリフトチューブ



カップラーポート

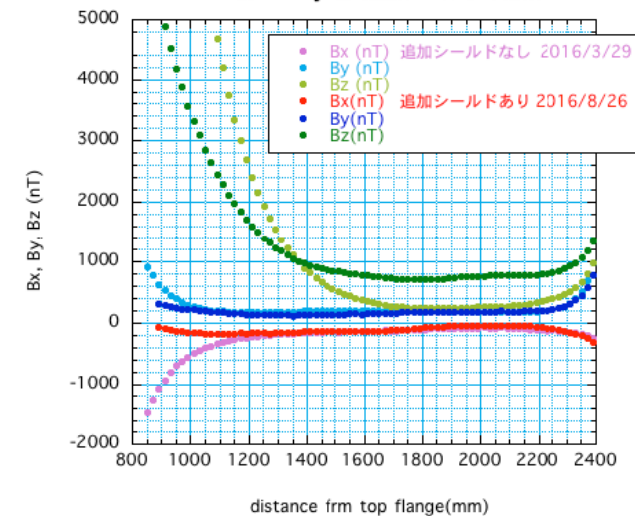


空洞性能試験設備

- ・KEKのAR東第二実験棟内ピット、クライオスタット、磁気シールドを借りる
- ・テストアセンブリ準備用やぐら、測定ブース、測定システムを設置
- ・クライオスタット内磁場測定結果より磁気シールドを延長



理研AR cryo_ 追加シールドの効果

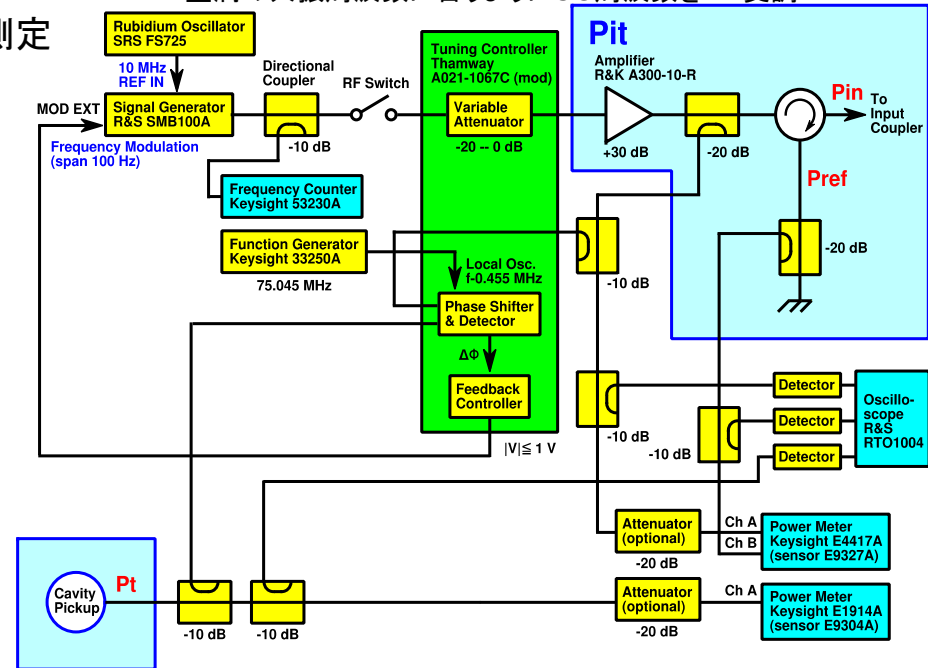


空洞単体性能試験

- ・入力電力、反射電力、ピックアップ電力、減衰曲線の測定により空洞のQ値を求める



空洞の共振周波数に合うようにSG周波数をFM変調



$$P_0 = P_{in} - P_{ref} - P_t \quad P_{in} \text{ アンプ出力電力、} P_{ref} \text{ 反射電力、} P_t \text{ 空洞透過電力}$$

$$\beta_L = \frac{1 \pm \sqrt{P_{ref}/P_{in}}}{1 \mp \sqrt{P_{ref}/P_{in}}} \quad (\text{over/undercoupling})$$

$$\beta_t = P_t/P_0$$

$$\beta_{in} = \beta_L(1 + \beta_t)$$

$$Q_L = 2\pi f_0 \tau_{1/2} / \ln 2 \quad \tau_{1/2} \text{ オシロスコープで計測}$$

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta_{in} + \beta_t)$$

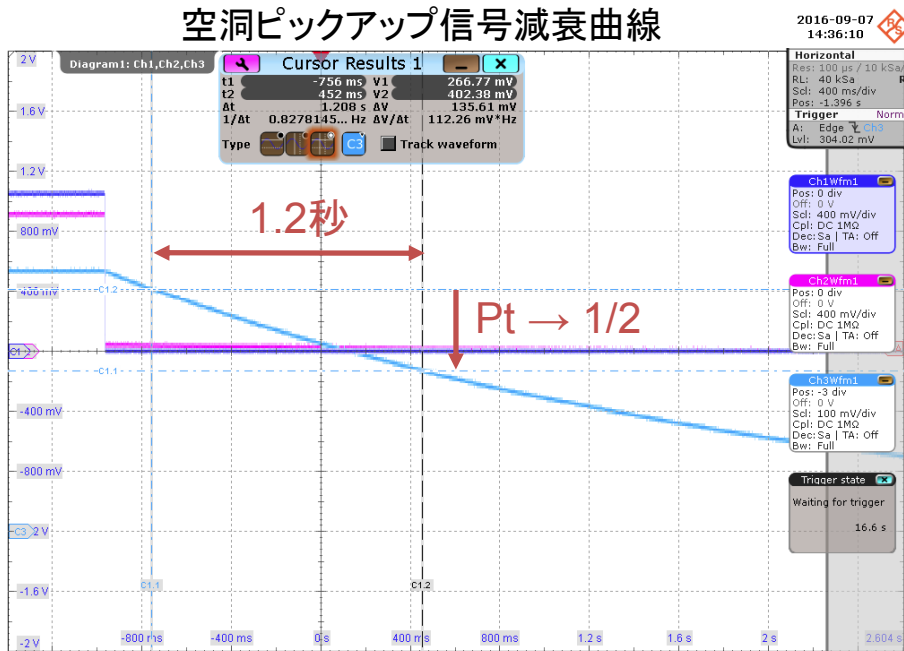
$$E_{acc} = \frac{\sqrt{(R_{sh}/Q_0)P_0Q_0}}{0.32} \text{ [MV/m]}$$

$$\frac{R_{sh}}{Q_0} = 578 \text{ } [\Omega]$$

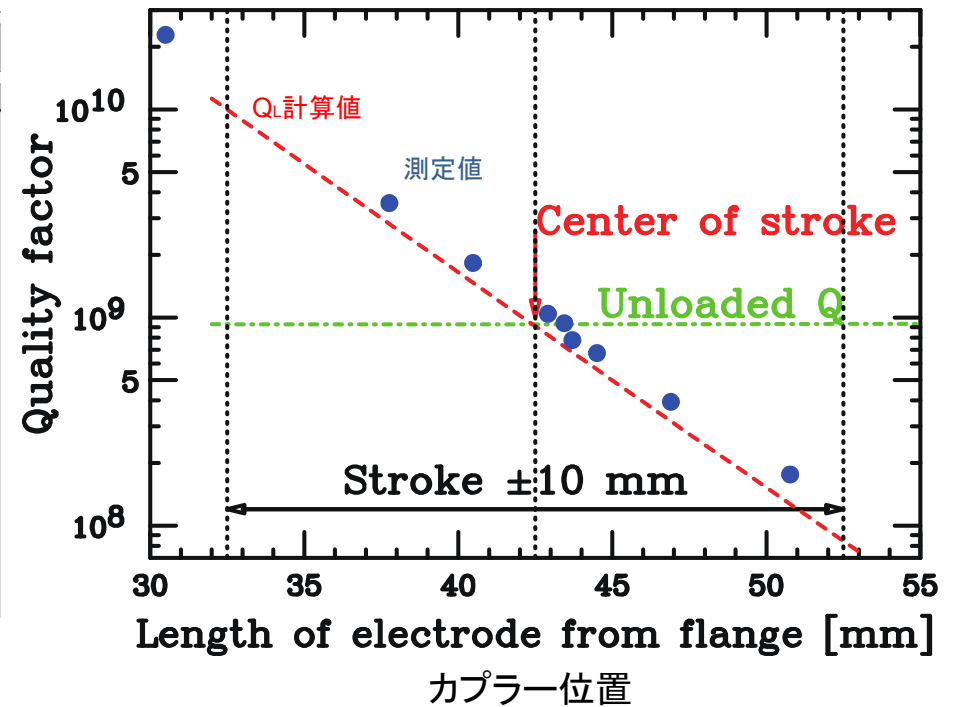


性能試験結果(2016/9/7)

空洞ピックアップ信号減衰曲線



カプラーの結合度は計算結果とほぼ一致



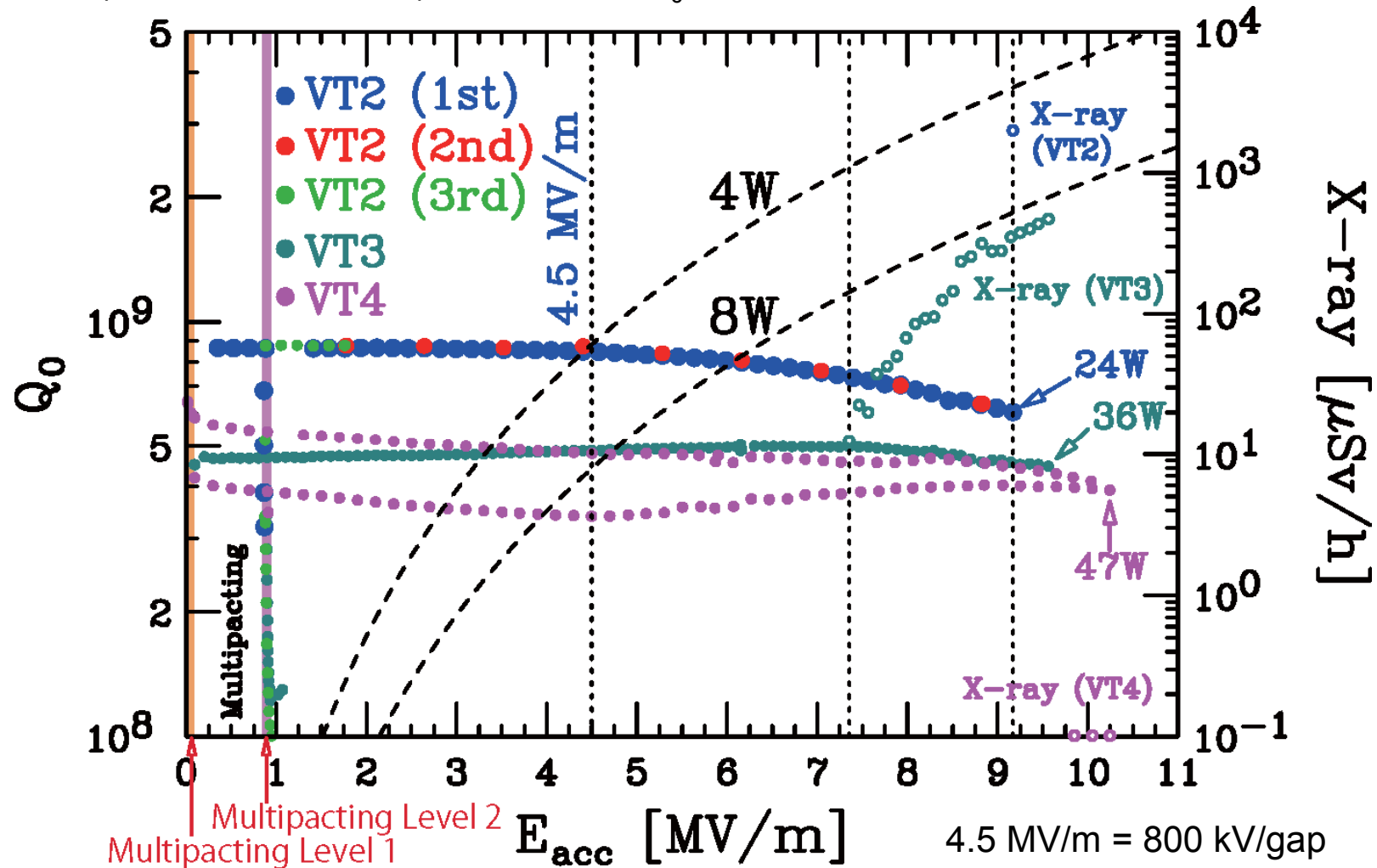
性能試験結果: Q値 (3回分)

VT1 (2016/6): 立上げ試験

VT2 (2016/9/7): $Q_0 = 8.7 \times 10^8$ @4.5 MV/m, $R_s = 27 \text{ n}\Omega$ 相当、9 MV/mまでX線観測されず

VT3 (2016/10/20, 再表面処理後): Q_0 54%に低下、7 MV/mでX線観測

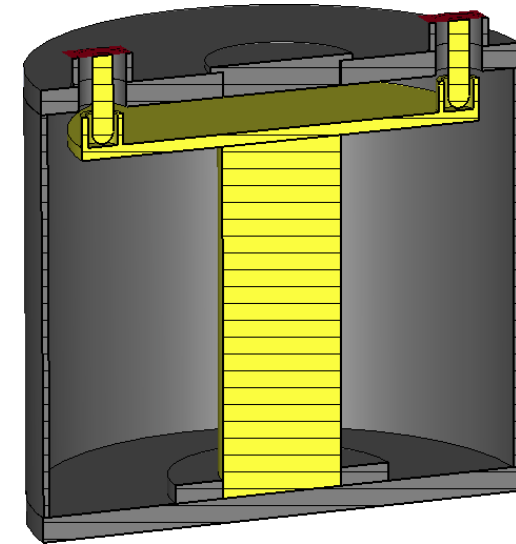
VT4 (2017/2/1, 再洗浄後): X線は回復、 Q_0 は回復せず



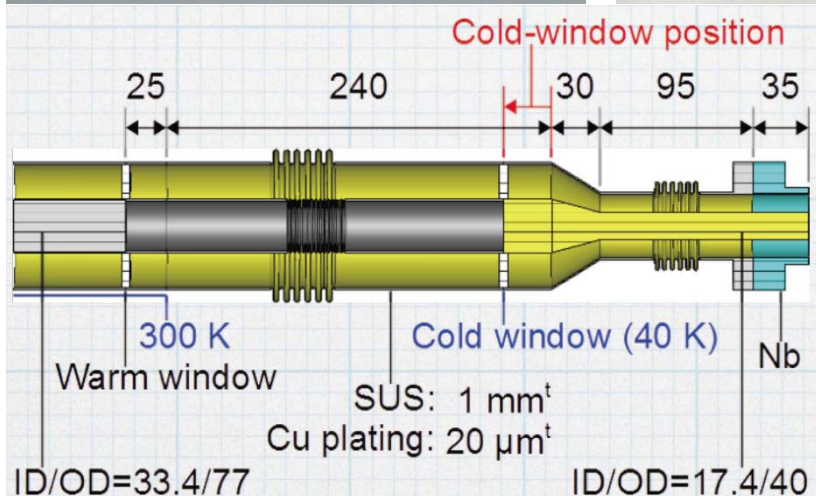
カプラーの製作

- ・ダブルウィンドウ(円板)型、最大RF入力電力 10 kW
- ・内導体 銅、外導体 SUS316L+銅メッキ
- ・侵入熱を減らすように低温ウィンドウ位置およびメッキ厚を最適化
- ・NTK HA997低温ウィンドウ、京セラA479B低温ウィンドウの2本製作
- ・低温ウィンドウ単体の液体ヘリウム冷却試験
 - NTK製破損、内リング肉厚を1.0→0.8 mmに変更、内リング形状変更
- ・カプラーテストスタンド空洞を製作

テストスタンド空洞

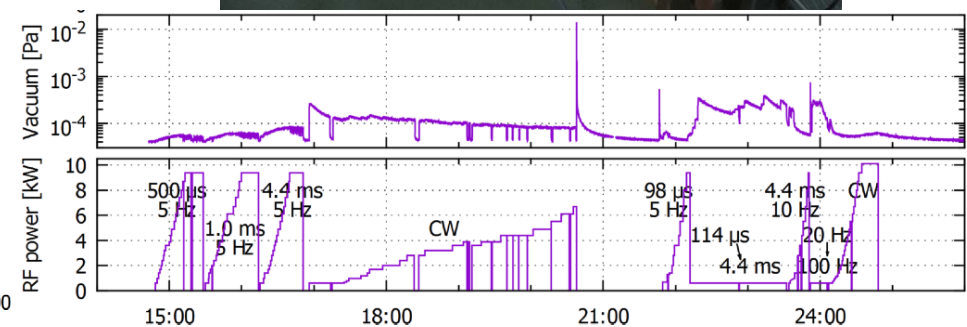
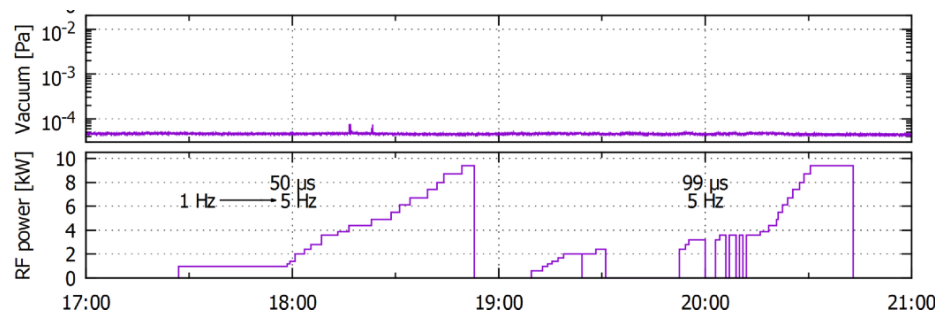


低温ウィンドウ



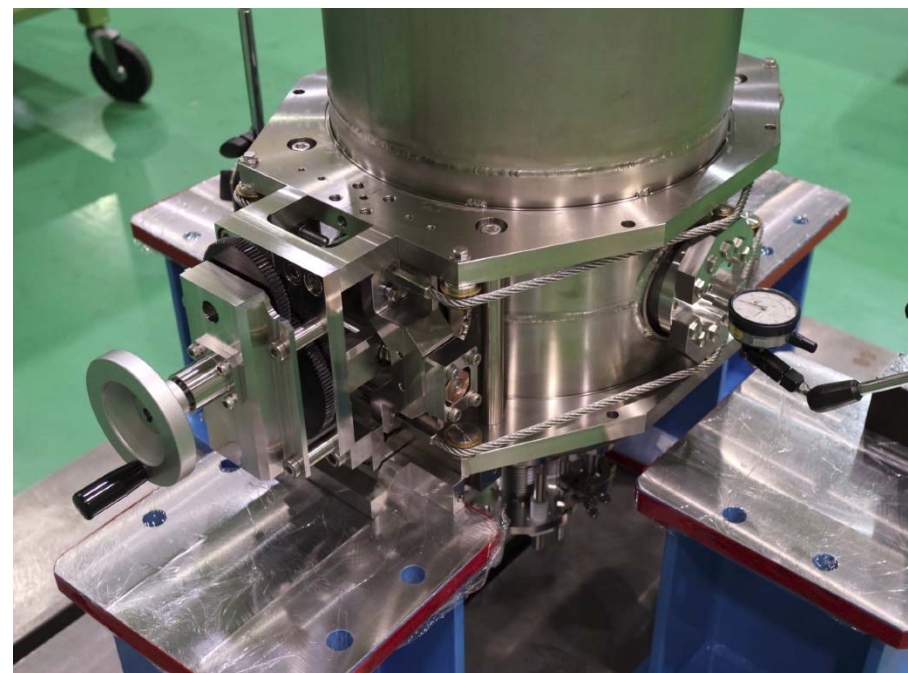
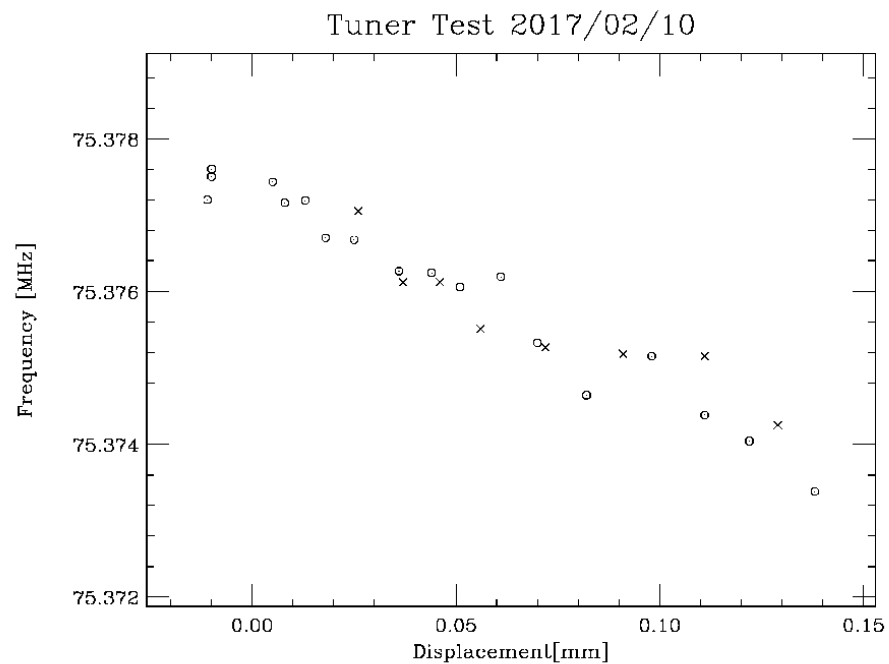
カプラーのコンディショニング

- ・クリーンブースを設置
- ・超純水で洗浄(超音波洗浄、掛け流し)
- ・テストスタンド空洞に組み込み真空引き、ベーキング
- ・約半日で問題なく10 kWまでコンディショニング完了



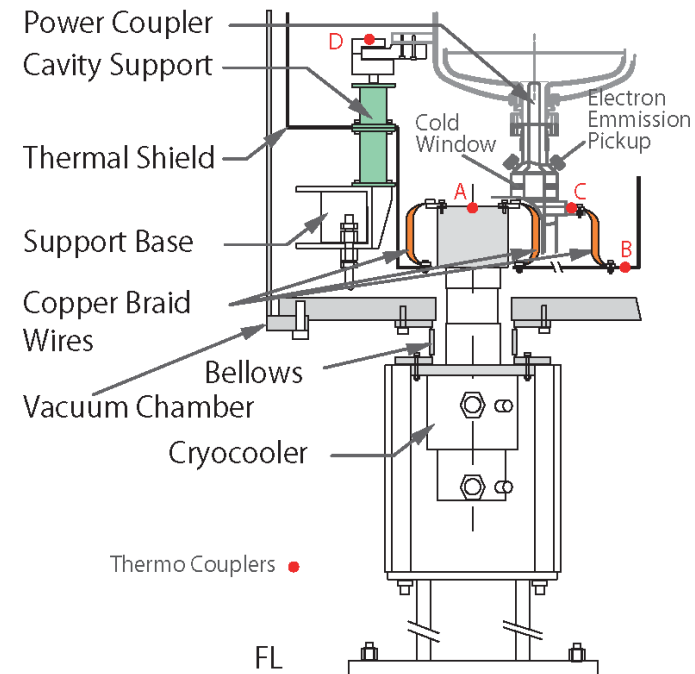
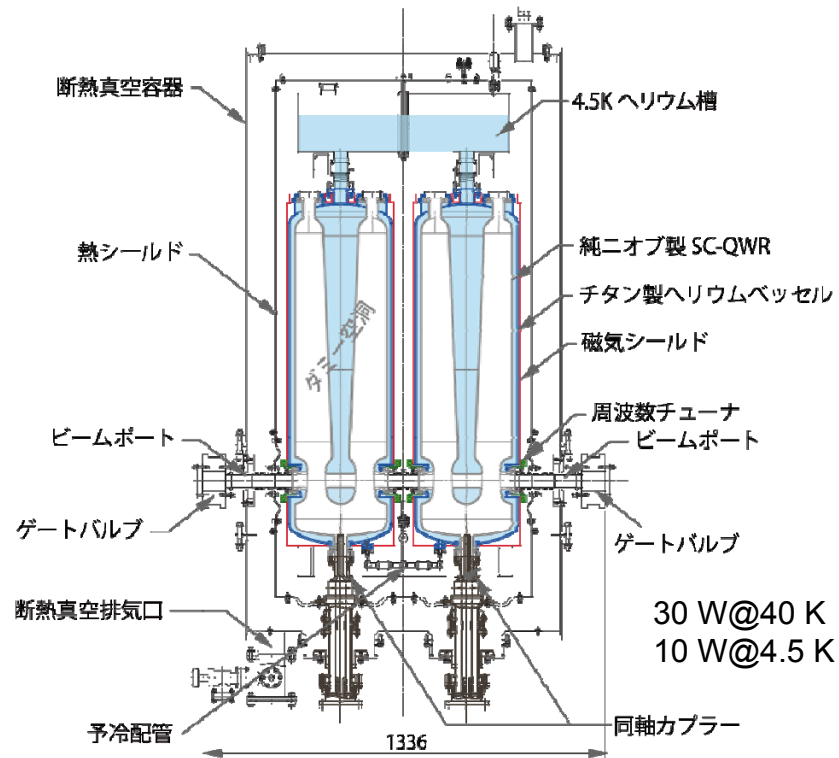
周波数チューナー

- ・ステッピングモーター駆動
- ・ワイヤーを引っ張り空洞をビーム軸方向に圧縮
- ・変形量に対する周波数変化を確認



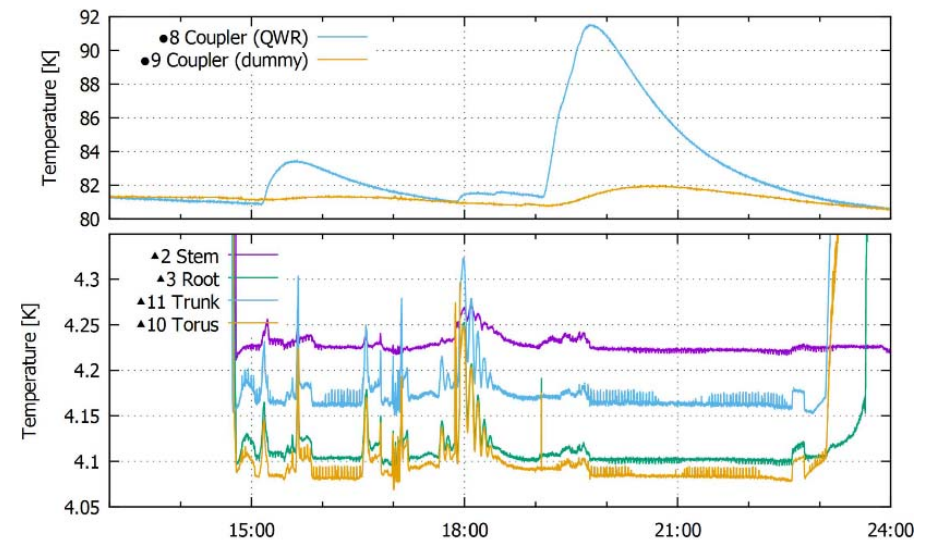
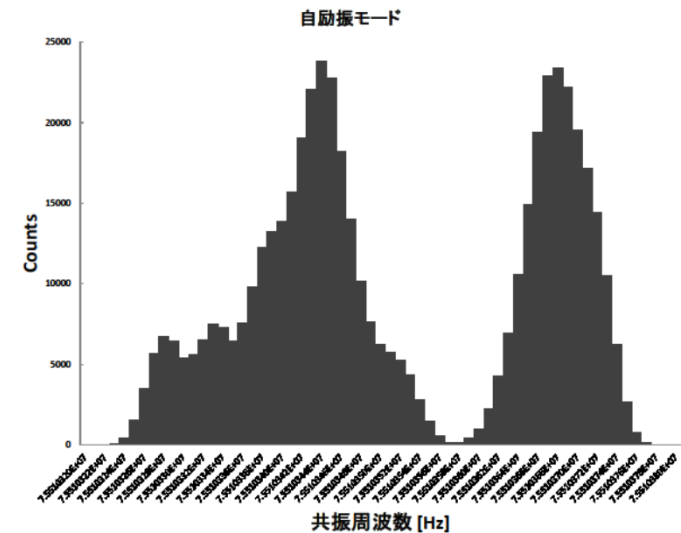
クライオモジュール

- ・空洞2台搭載可能(現状1台ダミー)
- ・4.5 K運転、開放容器
- ・GM冷凍機CH-110による40 K熱シールド
- ・GM-JT冷凍機V316SLCRによるヘリウム再凝縮
- ・小型冷凍機の振動対策
- ・磁気シールドはパーマロイを空洞周囲に巻く



クライオモジュール冷却試験

- ・2017年3月末より冷却試験開始
- ・2017年6月にRF励振試験成功(シールド用小型冷凍機オン)
 - 75.510 MHz@4.5 K
- ・小型冷凍機の振動の影響は見られなかった($\Delta f \sim \pm 10$ Hz)
- ・熱シールドの温度が下がらない(70 K~100 K)
 - 熱接触の問題
- ・デジタルlow-level回路の試験を実施
 - 自励振モード、信号発生器同期モード(他励振)で励振成功
- ・RFオンによりカプラーの40 Kサーマルアンカー温度が上昇
 - Multipacting?



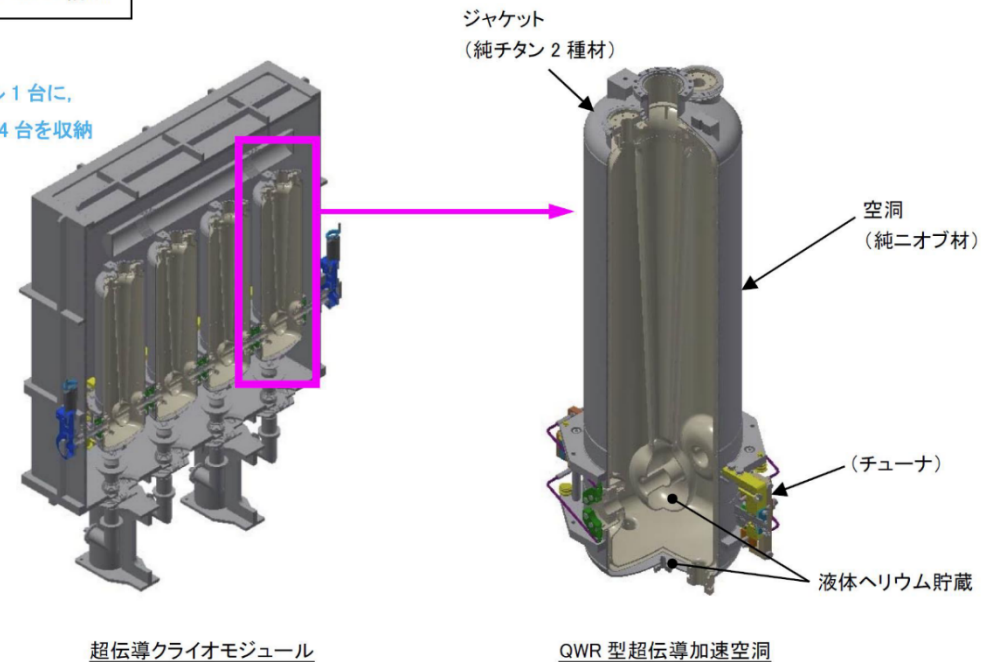
今後の予定

- ・引き続き励振試験
- ・熱シールドの熱接触改善
- ・制御盤、励振器の製作
- ・プランジャー式チューナーのテスト
- ・ Q_0 低下原因の調査
- ・GM-JT冷凍機の取付、運転

超伝導クライオモジュールの構成

超伝導クライオモジュール1台に、
QWR型超伝導加速空洞4台を収納

- ・理研重イオン線形加速器(RILAC)のアップグレード
 - 本件で得られた知見を活用し進行中
 - 73 MHzプロトタイプSC-QWR製作中、
10月に性能試験予定
 - SC-QWR実機10台製作開始



Collaborators



山田一成、上垣外修一、大関和貴、坂本成彦、須田健嗣、渡邊裕(理研仁科センター)
加古永治、仲井浩孝、梅森健成(KEK)
宮本明啓、仙入克也、柳澤剛(MHI-MS)

まとめ



- ・SC-QWRを搭載したプロトタイプシステムを開発
 - ・SC-QWRの製作は問題なく完了
 - ・空洞性能試験で1回目は想定通りの性能が得られたがその後 Q_0 が低下
 - ・カプラー、チューナーも製作しクライオモジュールとして組み上げた
 - ・クライオモジュールの冷却、励振試験を実施中
-
- ・得られた知見を活用し理研線形加速器のアップグレードが進行中

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです