



# ARES空洞用高周波窓可換式入力結合器の大電力試験

## HIGH-POWER TEST OF RF INPUT COUPLER WITH A REPLACEABLE WINDOW FOR THE ARES CAVITY

吉野一男 (KEK)

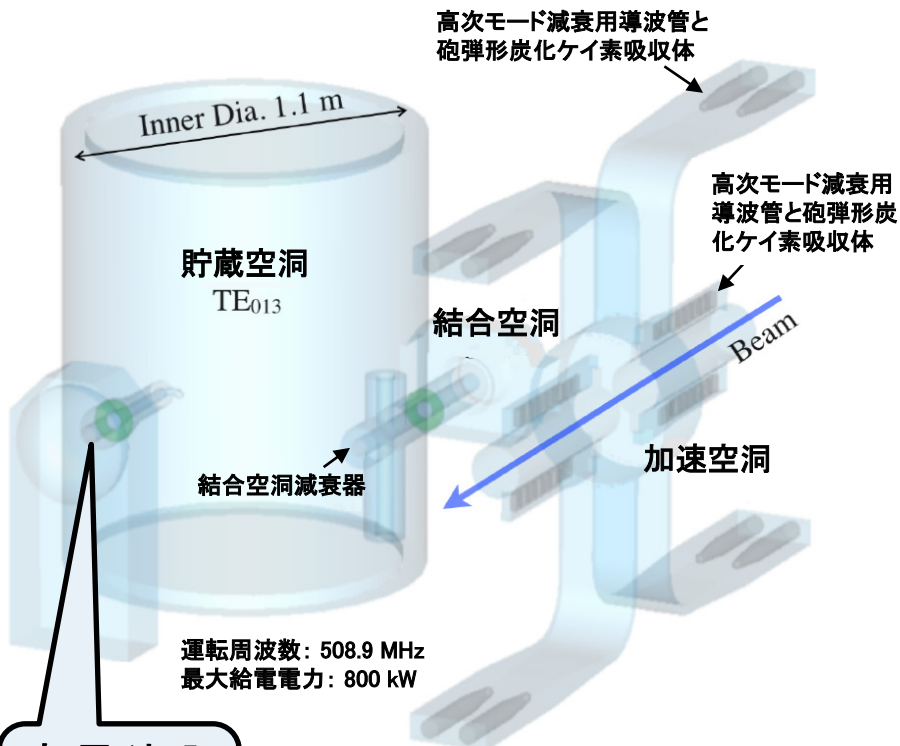
SuperKEKB-RF / ARES Cavity Group  
(影山達也, 坂井浩, 阿部哲郎, 竹内保直, 榎本瞬)



1. SuperKEKB\_ARES空洞用高周波入力結合器(カプラ)の概要
2. SuperKEKB用カプラの開発で得た知見(開発の背景)
3. 高周波窓可換式カプラ試作初号機(WRX15)の概要
4. WRX15の脱着試験→合格したが、課題も判明
5. WRX15の大電力試験→従来機と同等の性能を確認
6. まとめ
7. 今後の予定

## (1-1) SuperKEKB\_ARES空洞の概要

ARES : Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage

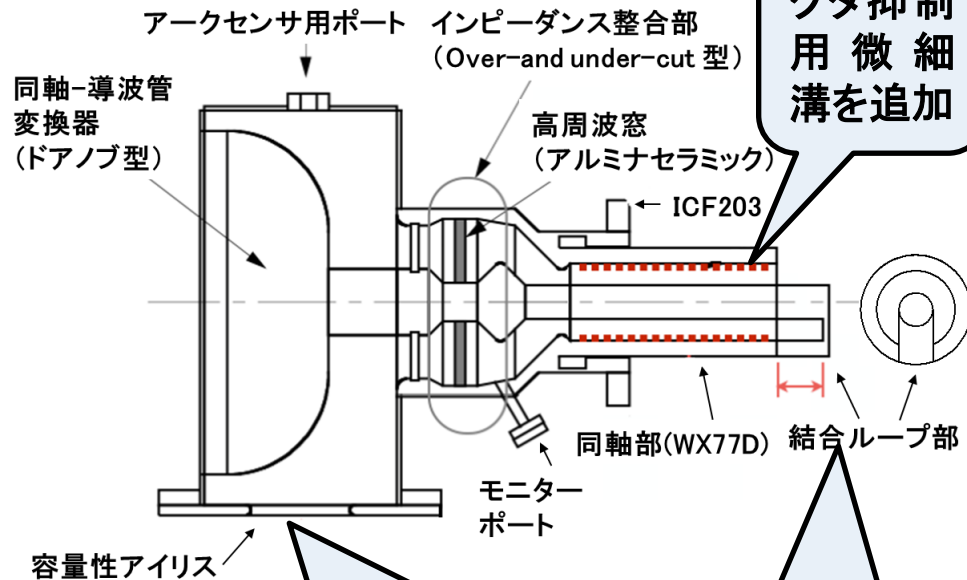


高周波入力結合器  
(カプラ)

主リングARES空洞の構成  
陽電子リング(LER) : 22台  
電子リング(HER) : 8台

(加速空洞と貯蔵空洞の間に結合空洞を介して、共鳴的に電磁気結合された常伝導の3連空洞系)

## (1-2) KEKBからSuperKEKB\_ARES空洞用カプラへの主な変更点



マルチパクタ抑制用微細溝を追加

最大入力電力(連続波)  
KEKB : 400 kW  
SuperKEKB : 750 kW

SuperKEKB  
加速電圧 :  $V_c=0.5$  [MV]  
壁面損失 :  $P_c=150$  [kW]  
ビームパワー :  $P_{beam}=600$  [kW]

入力結合度  $\beta$   
KEKB : 最大3  
SuperKEKB : 最大8  
結合ループを延伸  
(17→60mm)

## 2. SuperKEKB用カプラの開発で得た知見(開発の背景)

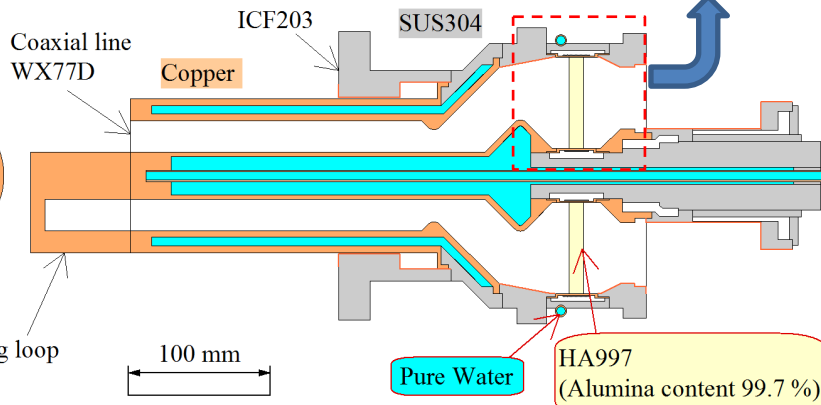
### (2-1) 高周波窓間接冷却型カプラの試作

目的:  
アルミナのロウ付け金具であるモリブデンが要因となる銅水路の腐食問題の根本的対策のため。

電力試験結果:

- ・目標の800 kWを達成
- ・200 kW前後から連続発光が観測され、主リングへの採用を断念

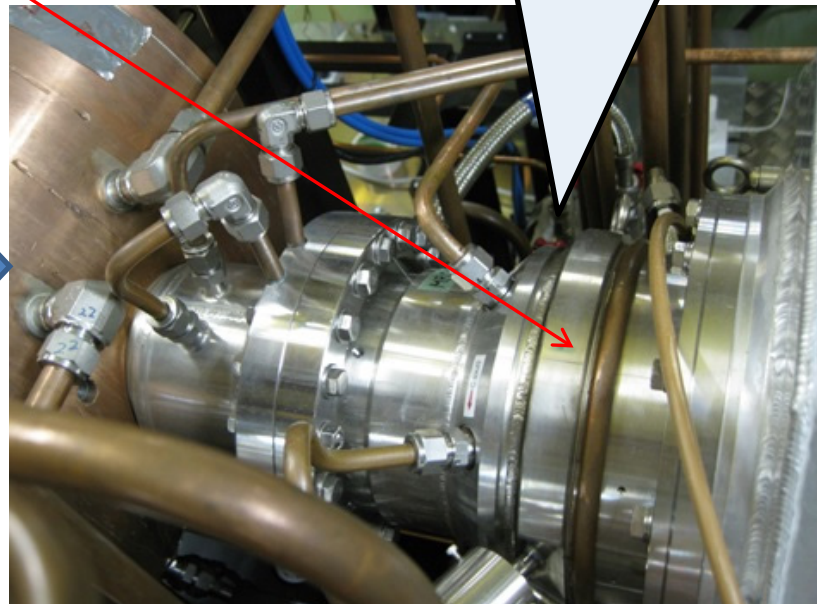
外導体間接冷却  
却用水路追加



(低誘電損失な高純度アルミナ材に変更)

### (2-2) 高周波窓間接冷却型カプラのダンピングリング(DR)空洞への適応

- ・DRの2空洞(最大電力200 kW)に取付けて、フェーズ2の運転では問題なく稼働



SuperKEKB 陽電子ダンピングリング(DR)空洞に取付けた間接冷却型カプラ

(2-3) 銀ロウ付けによる一体組立後に、窓の金ロウ付け箇所からの真空漏れ



メーカーの組立工程での真空漏れが、KEKBを含め69台中7台発生

(2-4) 窒化チタン膜を従来の10 nmから30 nmに厚くしたカプラの電力試験で約70 kW で窓が破損

原因調査で、銀ロウ付け工程による窒化チタン膜の電気抵抗の低下と結晶組織の変化を確認

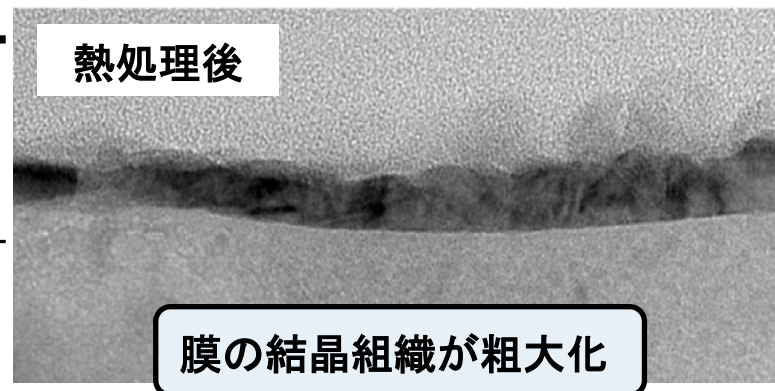
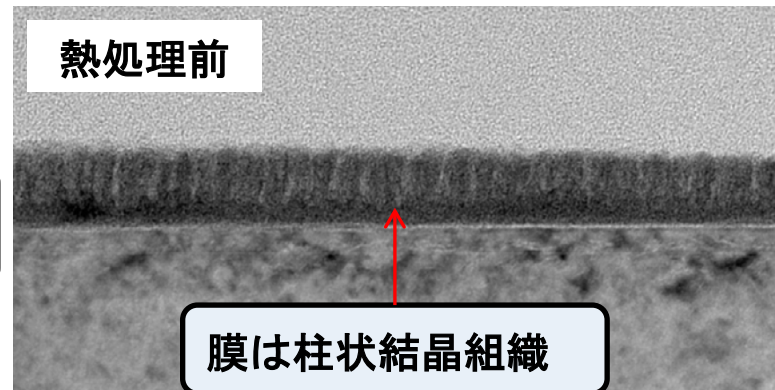
熱処理後に、膜の電気抵抗が7桁低下

アルミナ試験片への窒化チタン成膜有り (40 nm)

アルミナ試験片への窒化チタン成膜無し

	アルミナ試験片への窒化チタン成膜有り (40 nm)	アルミナ試験片への窒化チタン成膜無し
熱処理前	$5.6 \times 10^{11} \Omega$	$3.0 \times 10^{14} \Omega$
熱処理後	$3.6 \times 10^4 \Omega$	$1.6 \times 10^{14} \Omega$

水素炉の熱処理(800 °C)前後における、窒化チタン成膜面(40 nm)の抵抗値の変化



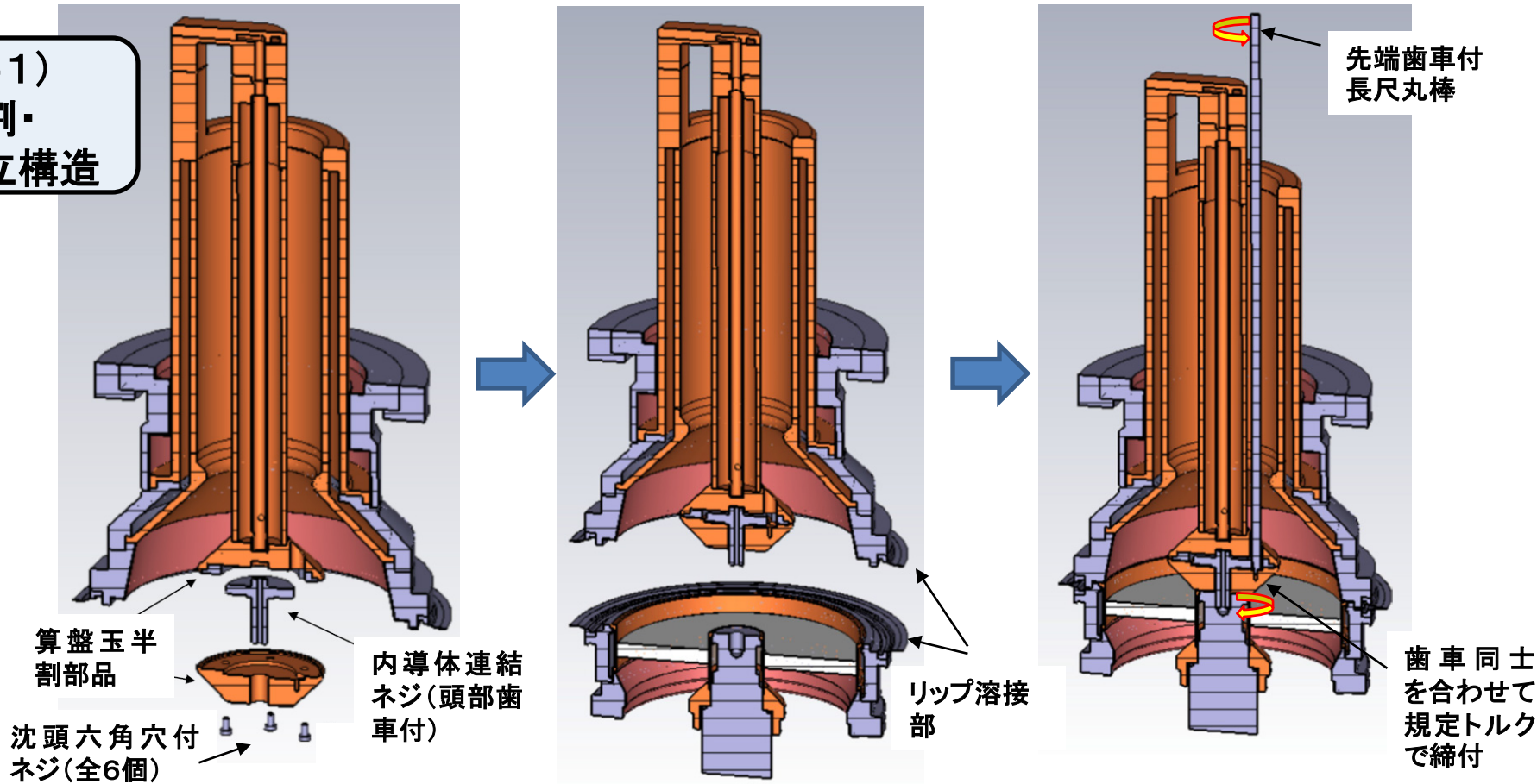
水素炉の熱処理(800 °C)前後における、窒化チタン成膜面の透過型電子顕微鏡による断面観察

### 3. 同軸窓可換式試作初号機 (WRX15)の概要

窒化チタン成膜後に熱処理(銀ロウ付け)に依らない一体組立が重要

機械的な一体組立方法による同軸窓可換式試作初号機 WRX15を開発

(3-1)  
分割・  
組立構造



WRX15(Window Replaceable eXperimental model fabricated in JFY 2015)の分割・組立構造の3D断面

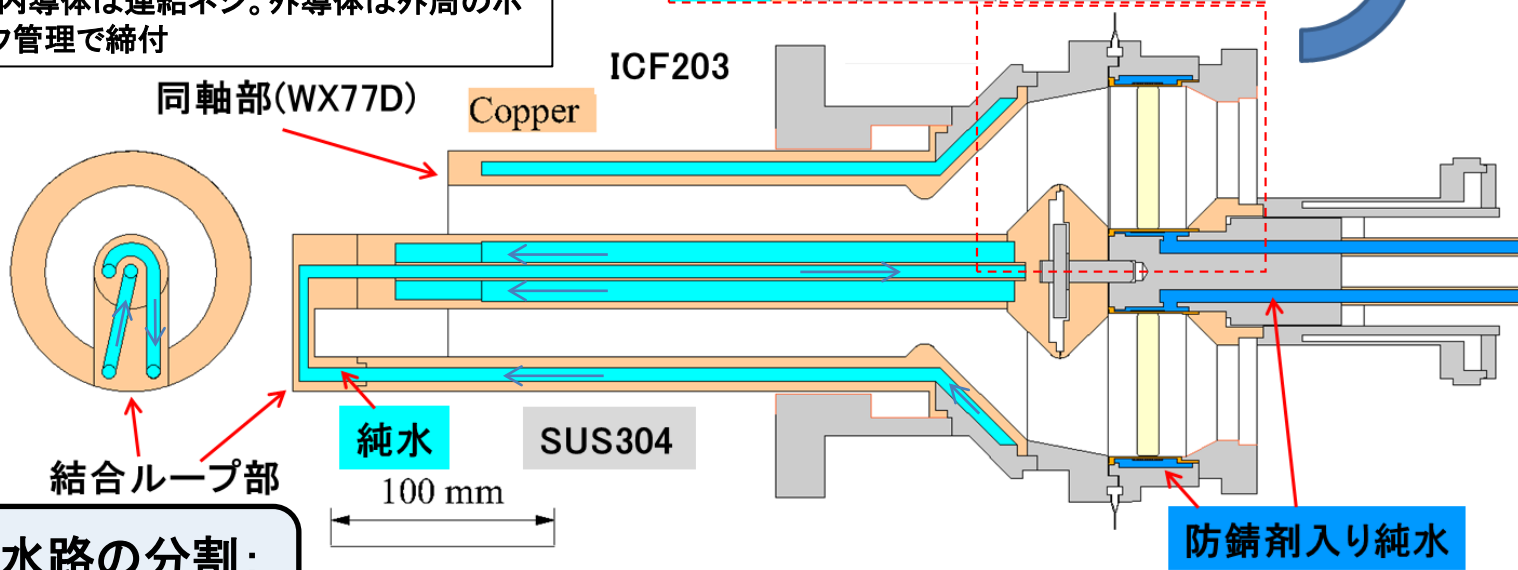
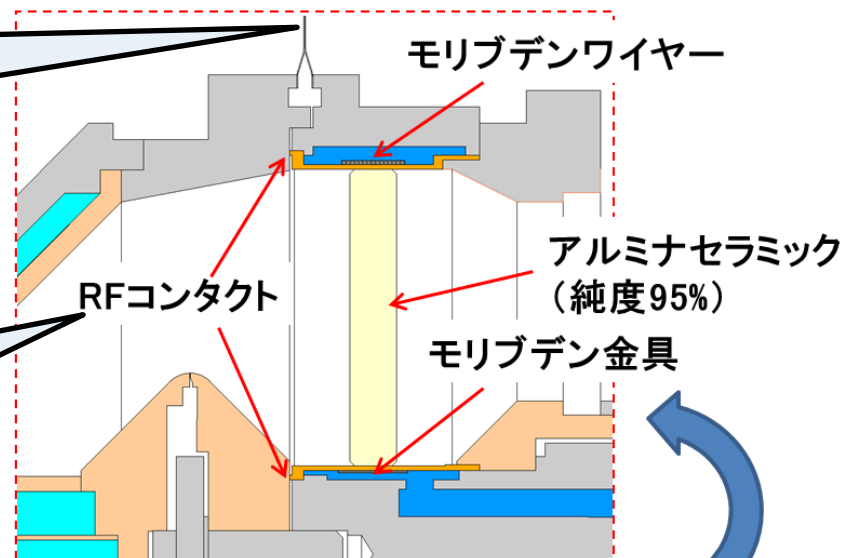
### 3. 同軸窓可換式試作初号機 (WRX15)の概要

(3-2) 外導体の真空封止:  
リップ金具(厚さ0.2mm)を双方に設け、その外周をTIG (Tungsten Inert Gas)溶接にて封止

リップ溶接部(SUS304)の形状:  
(外縁部から12 mm伸ばし、その内7~8 mmが水平部分)

(3-3) RFコンタクト:  
アルミナのロウ付け金具の真空側を、同軸ループ側の平面に押し当て

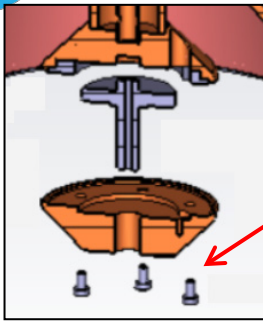
押し当ての軸力: 内導体は連結ネジ。外導体は外周のボルト(6本)をトルク管理で締付



(3-4) 内導体の水路の分割:  
結合ループ内を通して確保

WRX15の水路や窓の断面。

# 4. WRX15の脱着試験



算盤玉半割部品の組立  
ネジの締付けトルク値  
が、組立時に未確認

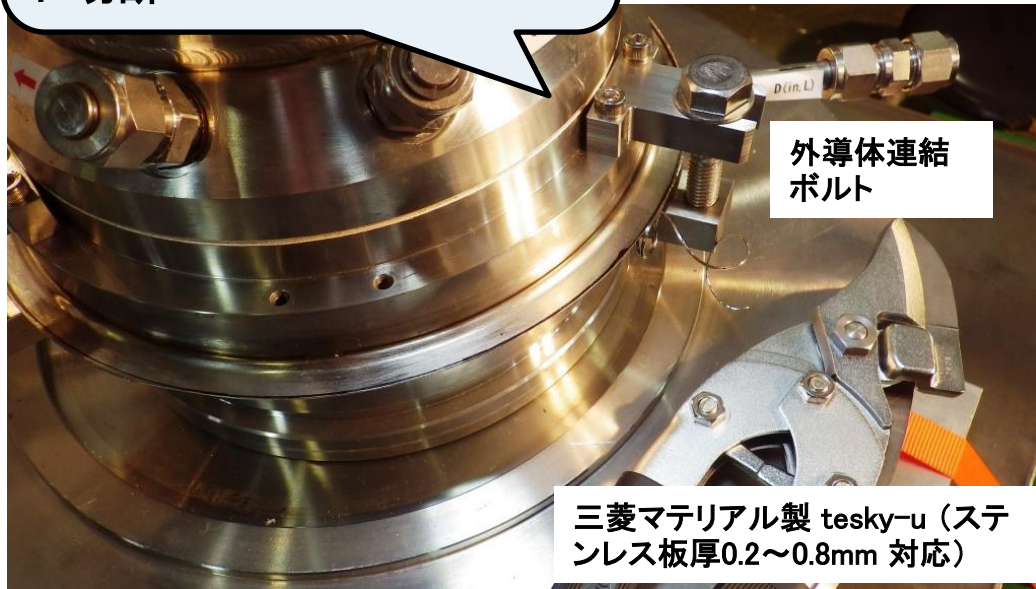
RFコンタクトの軸力は、全ネジ・ボ  
ルトの適正なトルク値で確保する  
ため、電力試験前に脱着

(4-1)リップ溶接部の切断:

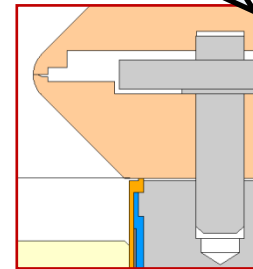
- ・市販の金切りはさみを使用
- ・1 mm程度の切りしろを目安に切断

(4-2)ループ側取外し:

- ・連結ネジの隙間長がネジ側の長さより短いため、徐々に吊上げながらネジを緩めて取り外し



WRX15のリップ溶接部切断作業



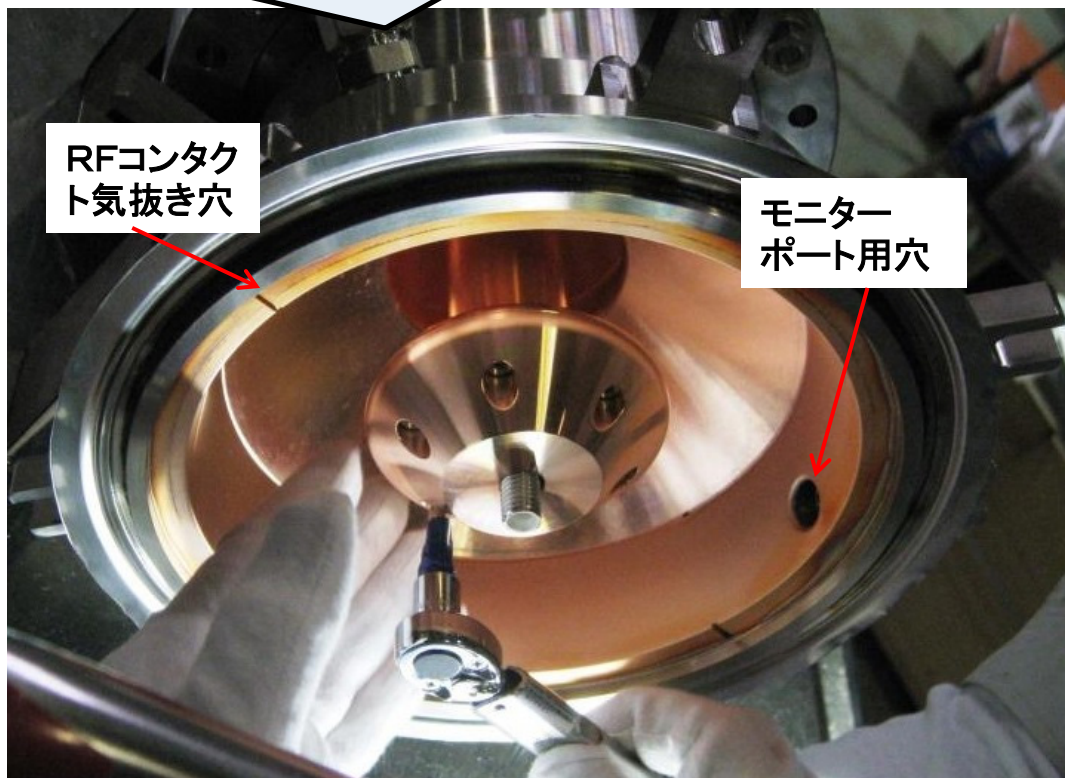
ループ結合部の取外し作業



## 4. WRX15の脱着試験

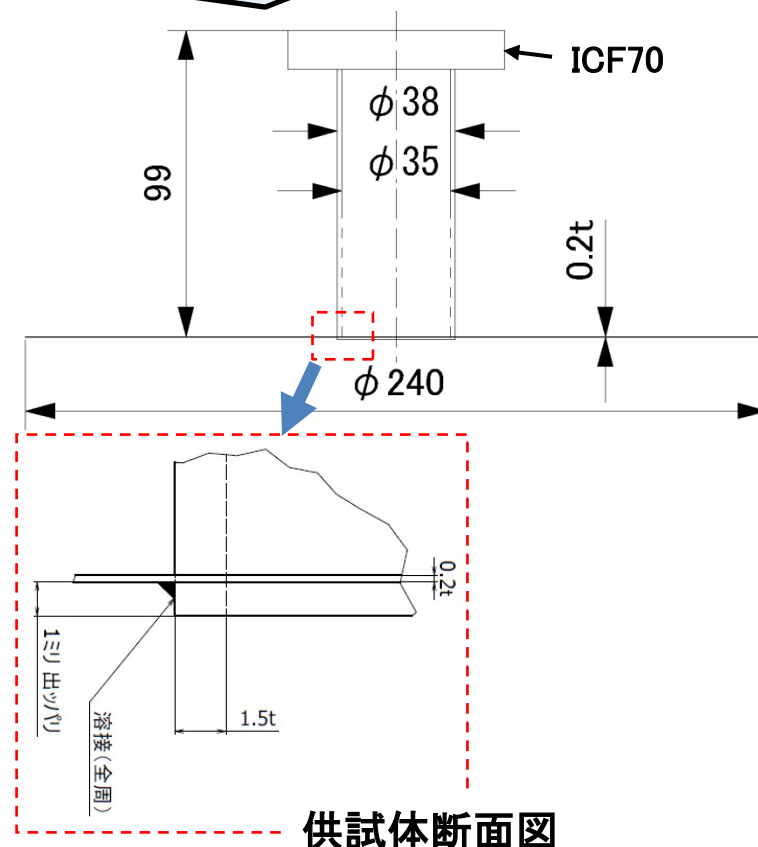
### (4-3) 算盤玉組立ネジの締付トルク値の確認:

- ・トルクレンチで規定トルク値(0.8 Nm)に締付
- ・確認後、4-2項の逆の手順で高周波窓に取付



### (4-4) 溶接模擬試験用の供試体:

- ・実機溶接前に、供試体3組で試験
- ・材質(SUS304)と厚みは同一
- ・外径は実機( $\phi 232$  mm)より大きめにし、同寸法の円板に溶接



算盤玉組立用の六角穴付ネジ(全6本)の締付トルク値の確認作業

## 4. WRX15の脱着試験

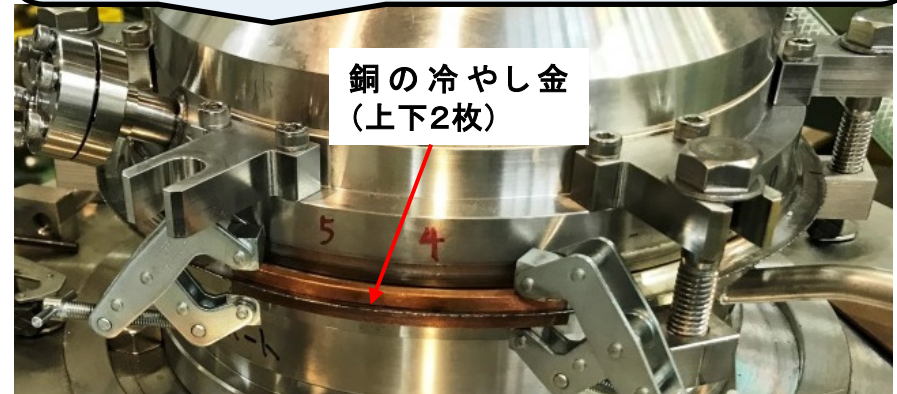
(4-5) 供試体のリップ外周の溶接：  
 メーカーからの溶接要領を参考にし、  
 溶接とリーク試験を何回か繰り返し、補修溶接  
 にて1組リーク試験に合格

供試体の溶接条件	
溶接機型番	Panasonic TRS150
初期電流	4A
溶接電流	9A
クレーター電流	4A
パルス有無	無し(直流)
アルゴンガス流量	10 L/分
タングステン電極	φ 1.2 mm



真空試験中の溶接模擬試験用供試体

(4-6) 実機のリップ外周の溶接：  
 ・ 供試体で合格した溶接条件で行ったが、リーク試験に不合格  
 ・ その後の補修溶接でも不合格



リップ部の溶接個所の冷やし金の固定



・ 極薄板(0.1mm～) 溶接に対応した溶接機に変更して、補修溶接を継続。

# 4. WRX15の脱着試験

(4-7)リップ外周の重ね板補修溶接  
補修を繰り返して切りしろが残っていない箇所  
への、当て板(t0.5 mm, SUS304)を上下に挟んだ  
重ね板補修溶接

リップ部の重ね板補修溶接前



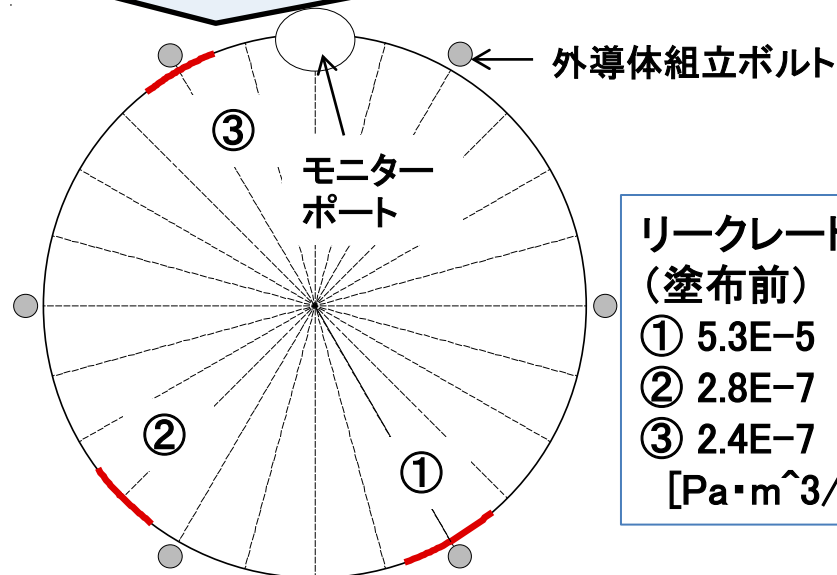
実機の補修溶接の変更点	
溶接機型番	DAIHEN マイクロ TIG MRTP-135
パルス有無	有り(300Hz)

重ね板補修溶接後も  
リークが残った箇所

リップ部の重ね板補修溶接後



(4-8)補修溶接後に残ったリーク箇所へのTORR SEALによる真空漏れ封止  
3箇所(赤色)に塗布し、リーク試験は1回目で合格



## 5. WRX15の大電力試験

### (5-1) 高周波窓の電力試験前処理:

- ・オゾン水洗浄処理:  
濃度8 mg/L、100 cc、約10分保持
- ・ベーキング処理:  
最大でも100 °C以下にして6日間継続

### (5-2) テストスタンドへのセットアップ:

- ・入力側カプラはWRX15を取付
- ・出力側カプラは従来機  
(SuperKEKB用試作機)を取付
- ・カプラへの流量は、全系統とも5 L/min

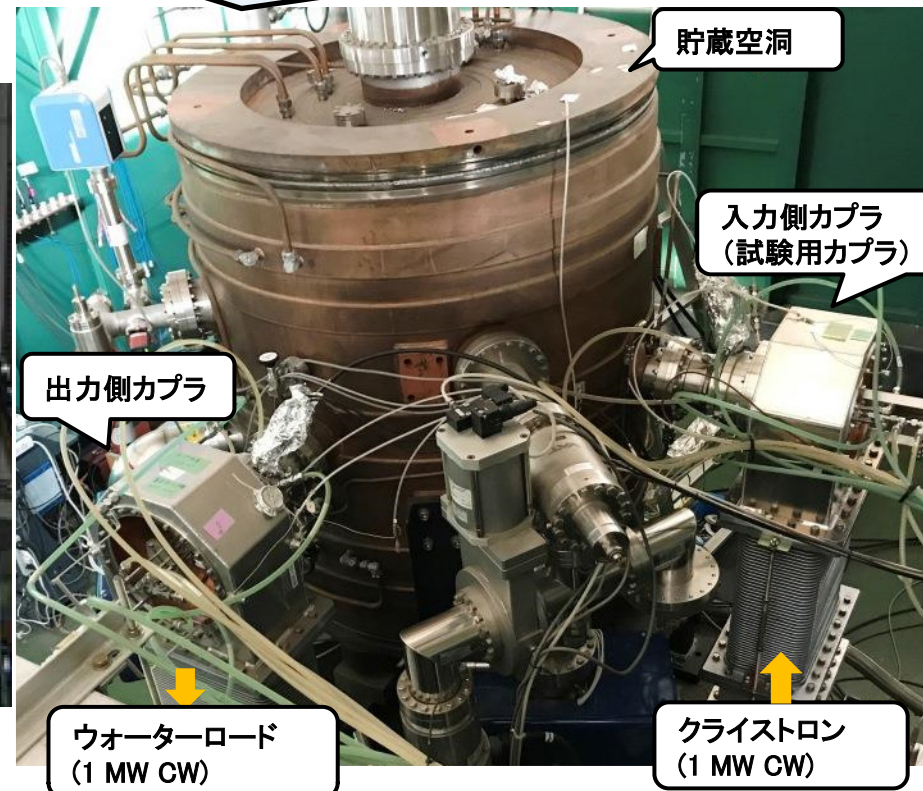


オゾン水の投入



(温風機とリボンヒーターを使い、高周波窓側は真空排気)

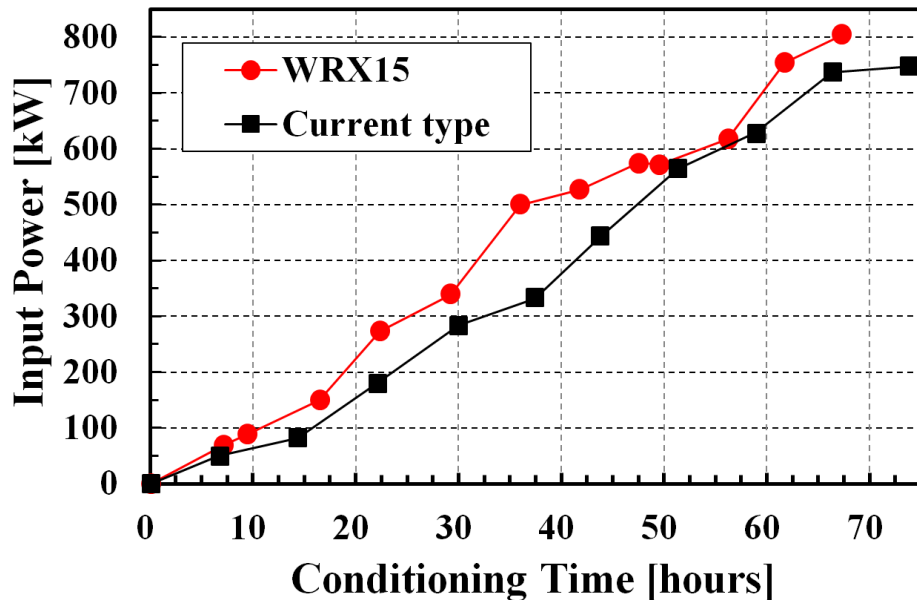
ベーキング処理



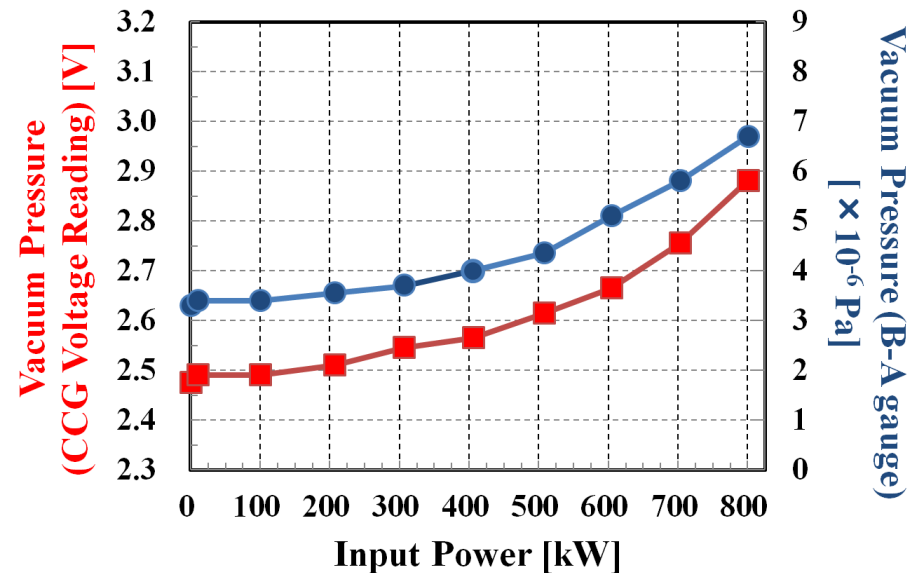
テストスタンドへのセットアップ

## (5-3) 大電力試験結果

- ・従来機と同等のコンディショニング時間(約70時間)で入力電力の目標800 kWに到達
- ・従来機と同様に、窓の発光は無し(コンディショニング過程での真空圧力の跳ねによる発光を除く)
- ・コンディショニング終了後、100 kWステップで各種データを測定し、インターロックも無く順調に推移
- ・クライストロンが安定動作する最大出力(約900 kW)で、空洞入力電力で最大835 kWを確認



入力電力の日中の最大値の履歴。  
(WRX15と従来機の比較)



コンディショニング後の100kWステップでの  
真空度の推移。

### 目的:

SuperKEKBのARES空洞用カプラの開発過程において、高周波窓への窒化チタン成膜面が、一体組立の工程である銀ロウ付けの熱処理により悪影響を受けることが判明した。そこで、銀ロウ付けによる一体組立に依らないカプラの開発を目指した。



### 方法:

SuperKEKB用カプラと互換性を保ちながら、同軸高周波窓部がボルト・ネジの軸力による機械的な方法で脱着できる高周波窓可換式カプラ(WRX15)を新たに開発し、その大電力試験を行った。



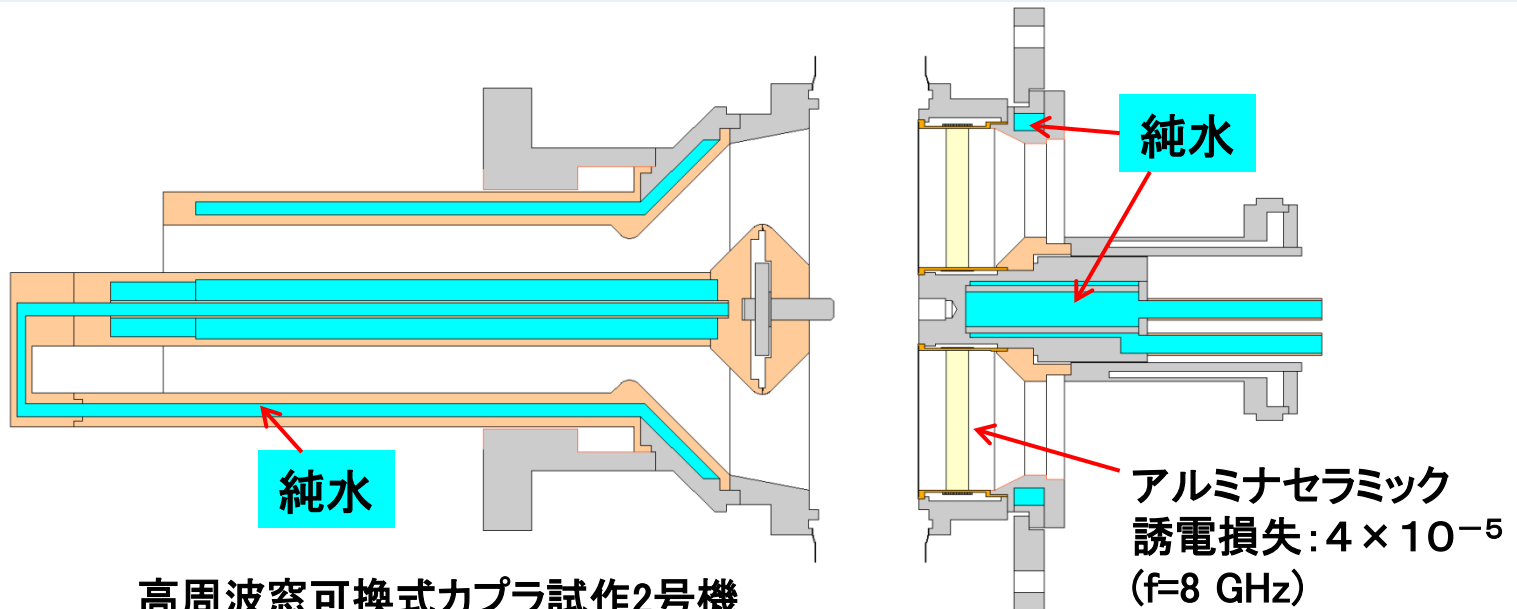
### 結果:

再組立時のリップ溶接による真空封止に課題を残したが、大電力試験の結果は、入力電力で最大835kW(連続波)まで投入でき、銀ロウ付けによる一体化組立された従来機と同等の性能を確認した。

## 7. 今後の予定

現在、高周波窓可換式カプラ試作2号機を開発中

- リップ金具の溶接を容易にするため、厚みを0.2 mmから0.4 mmに変更
- アルミナ材料を低誘電損の高純度アルミナに変更し、アルミナの内・外周水路には通水しない間接冷却方式を採用
- 高純度アルミナのカプラの試作機では200kWから窓が発光したが、熱処理（銀ロウ付け）の影響が無い窒化チタン成膜面が、マルチパクタ放電による発光を抑えることを期待



高周波窓可換式カプラ試作2号機  
(高周波窓間接冷却型) 検討図

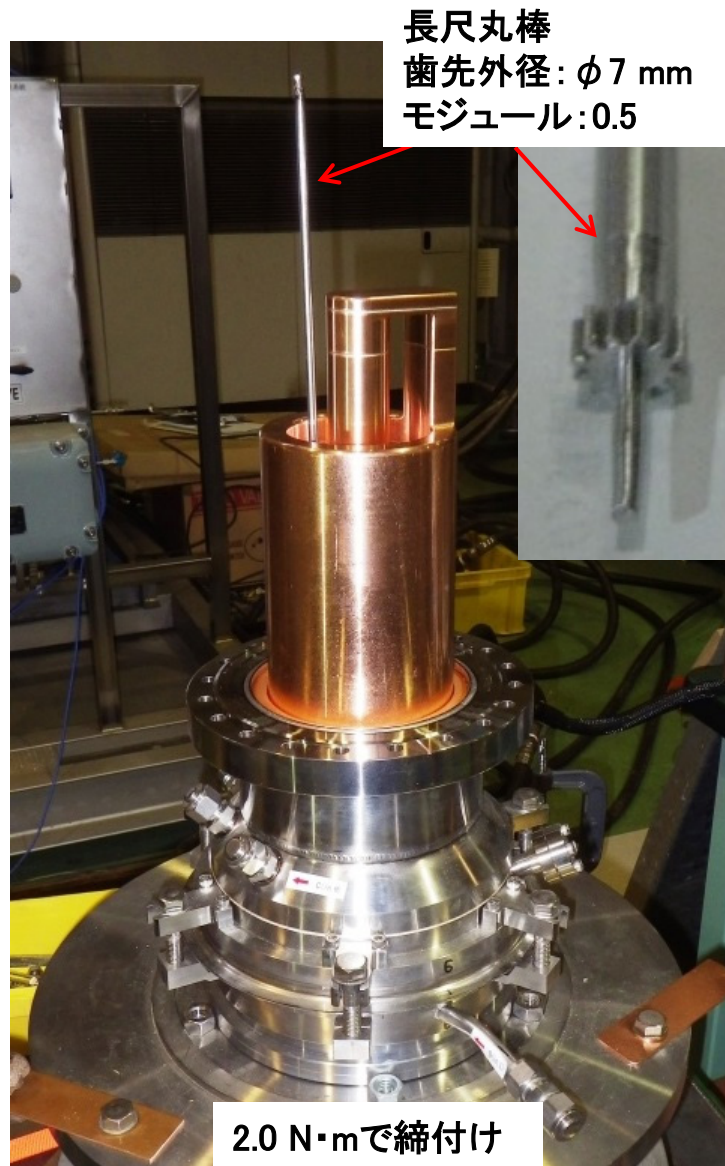
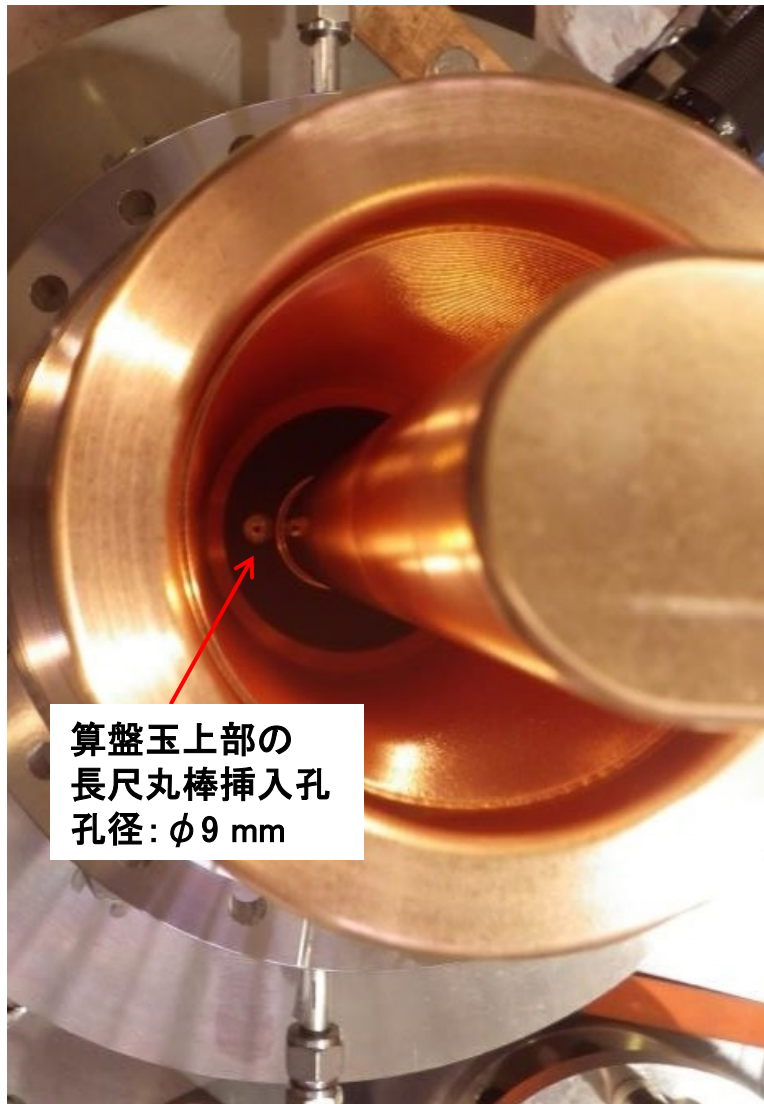


**ご清聴ありがとうございました**

**Kazuo.yoshino@kek.jp**



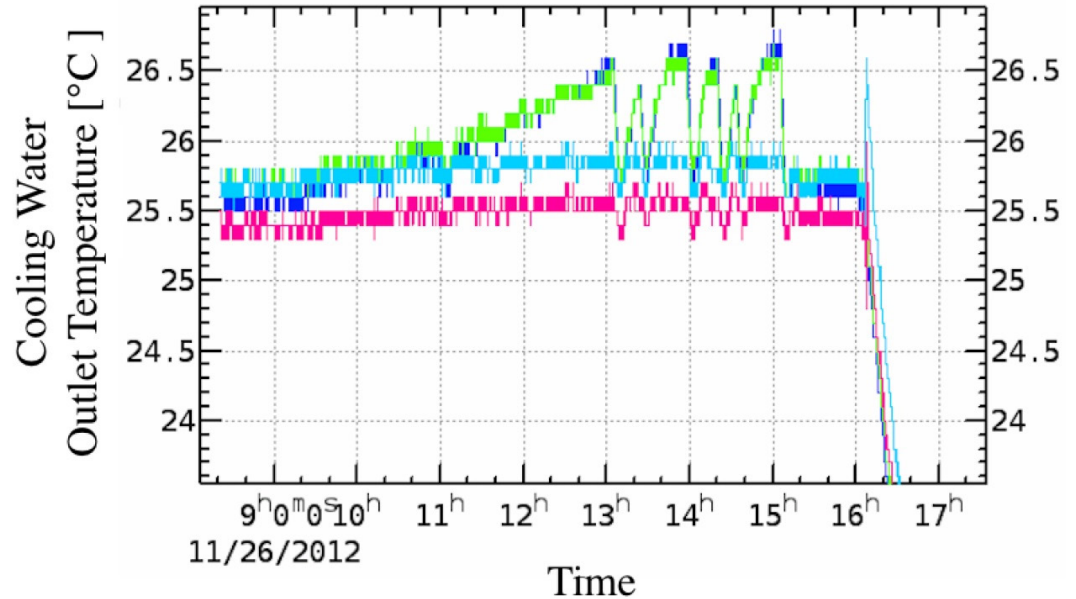
# 内導体連結ネジ締付用長尺丸棒の挿入



トルクドライバー  
(左右両用)  
BESTOOL-  
KANON: N20LTDK

# 窓破損時のカプラ水温変化と窒化チタン膜(厚み30 nm)の発熱量と抵抗値

- Inner conductor of the input RF window
- Outer conductor of the input RF window
- Inner conductor of the output RF window
- Outer conductor of the output RF window

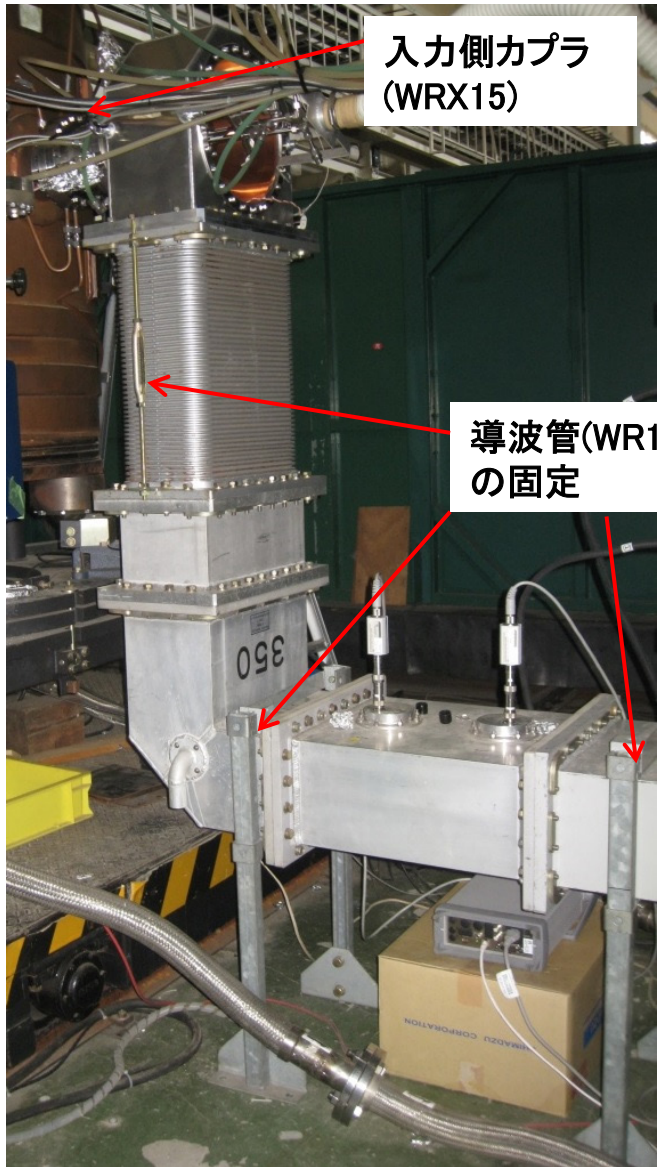
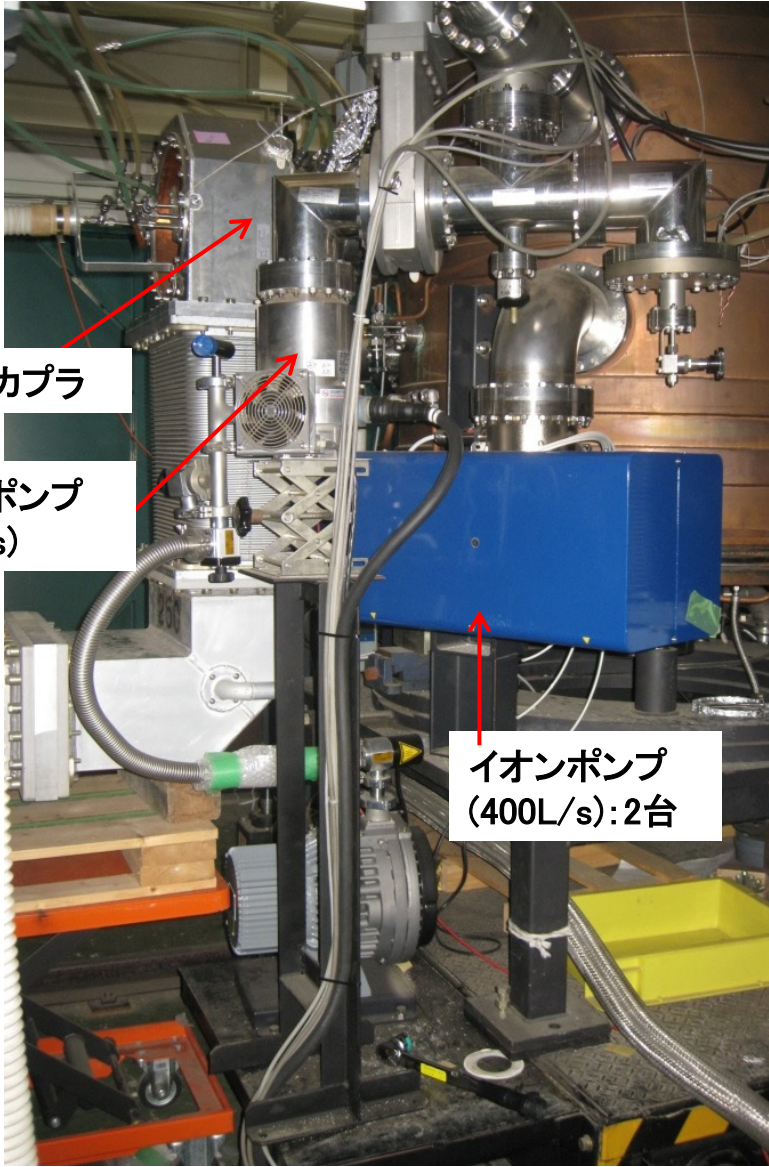


異常発熱の原因は抵抗性と推定

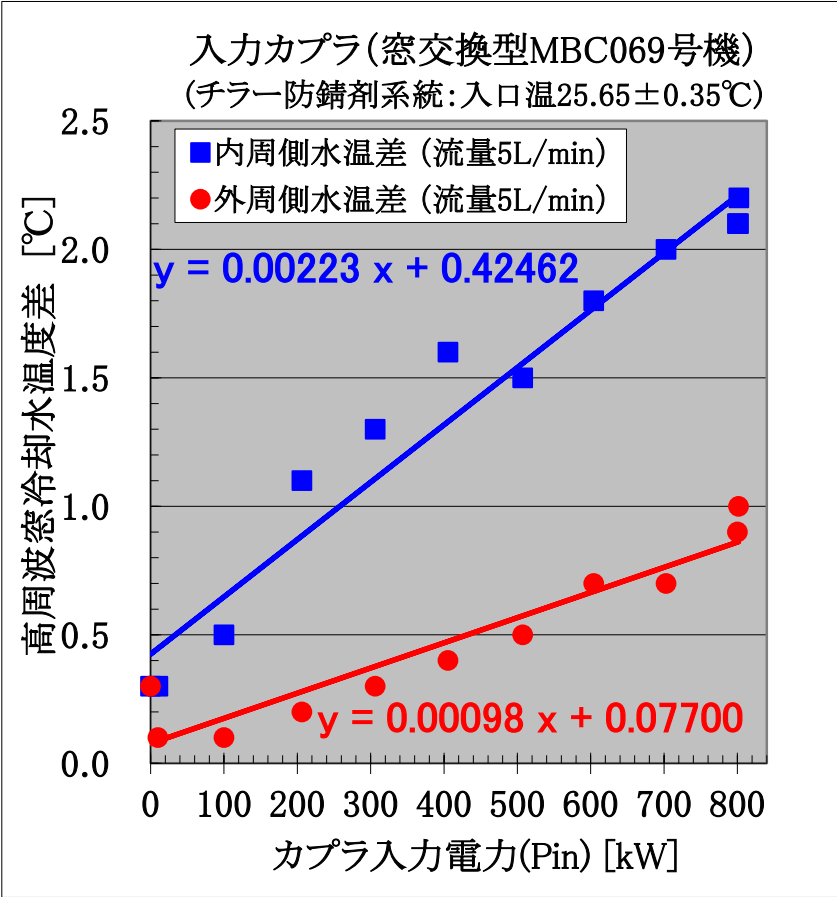
入力カプラ70 kW の窓部総発熱量は、480 W、  
 出力カプラ58 kW(入力電力の5/6)では、70 W。  
 出力カプラ通過電力を70 kW に揃えると、当該窓部での総発熱量は84 W。  
 それぞれの差、約400 Wが当該窓で観測された抵抗性の異常発熱現象由来とした。  
 通過電力70 kW 時の上記発熱量400 W を窒化チタン膜での抵抗性発熱と仮定すると、  
 膜抵抗は38 k $\Omega$  (膜抵抗はアルミナ円板全面で一定と仮定)。  
 この値は高周波窓用の窒化チタン膜の抵抗値としては異常に低い。

- 窓破損時の冷却水温度:  
 入力カプラ窓の内・外周2系統の冷却水の温度上昇が、出力カプラ側に比べて高い。
- コンディショニング中に窓での連続的な放電、発光が無い状態で、70kWでアルミナが突然破損。

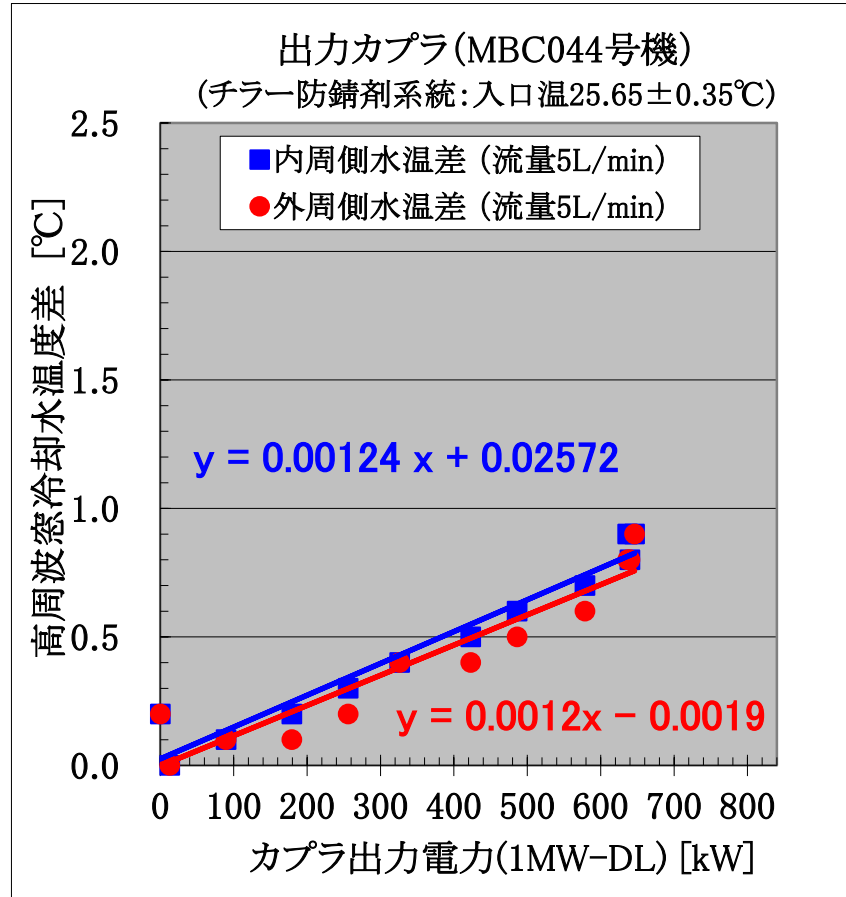
# テストスタンド(貯蔵空洞)への取付1



WRX15の内導体水路の温度上昇が、従来機に比べ約1.8倍上昇している。  
 これは、従来機にあった高周波窓の中心を通っていた内導体冷却用の水路を、分割構造にするため省いた影響である。



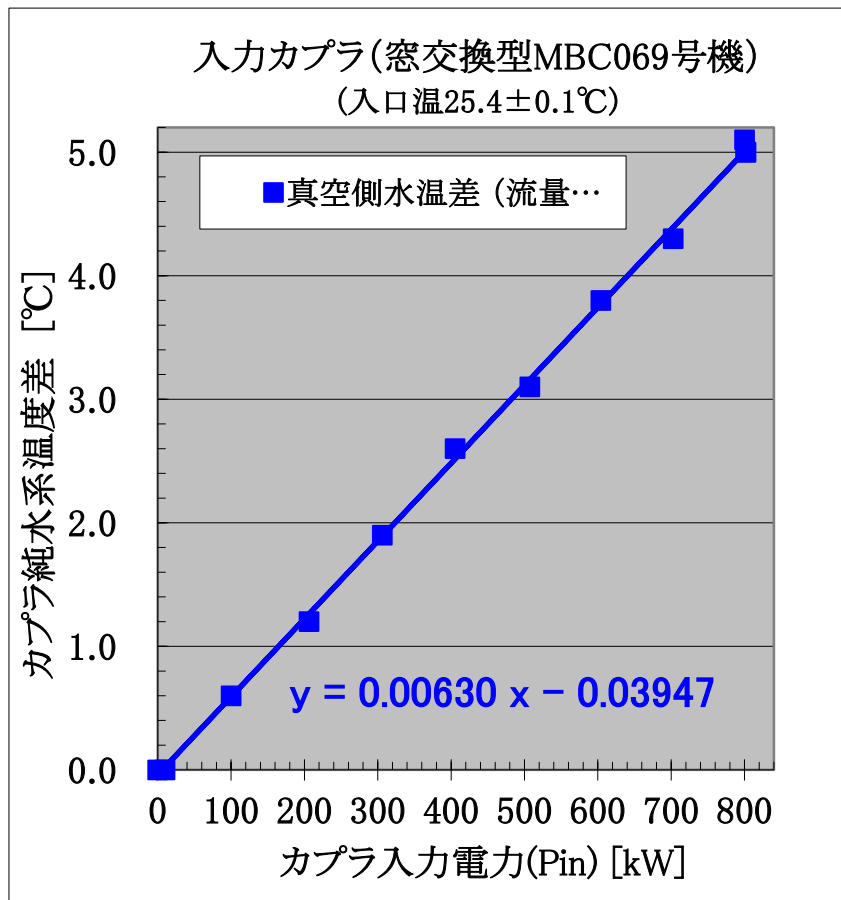
WRX15(入力側カプラ)の窓周囲の水溫変化



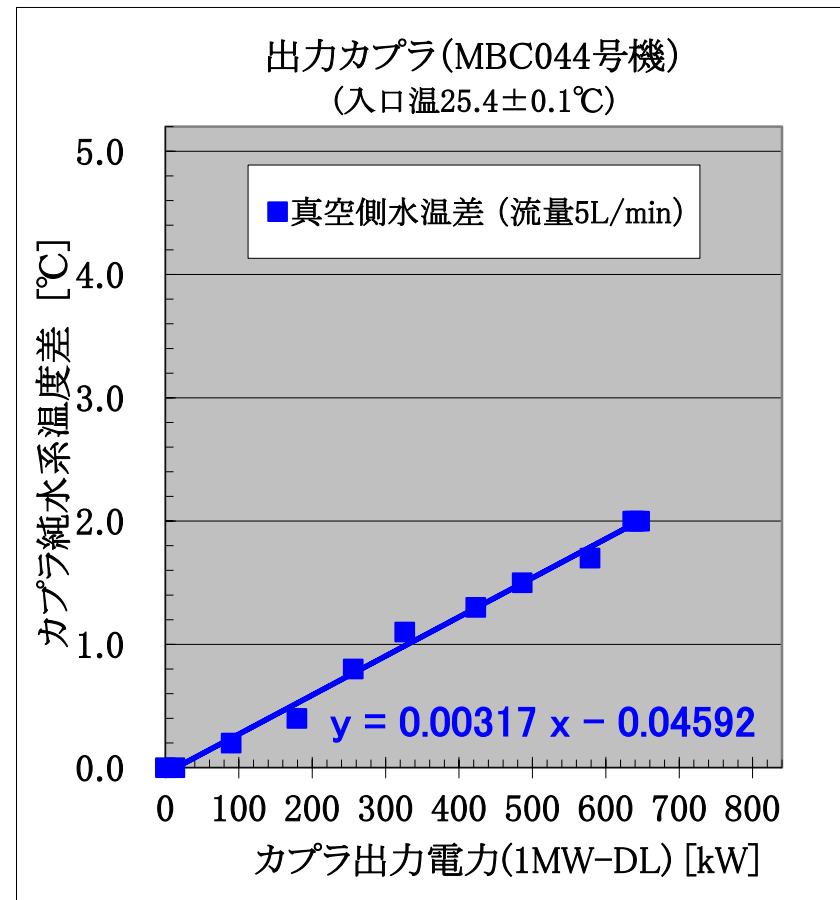
出力側カプラ(従来機)の窓周囲の水溫変化

# 同軸部側の水温変化

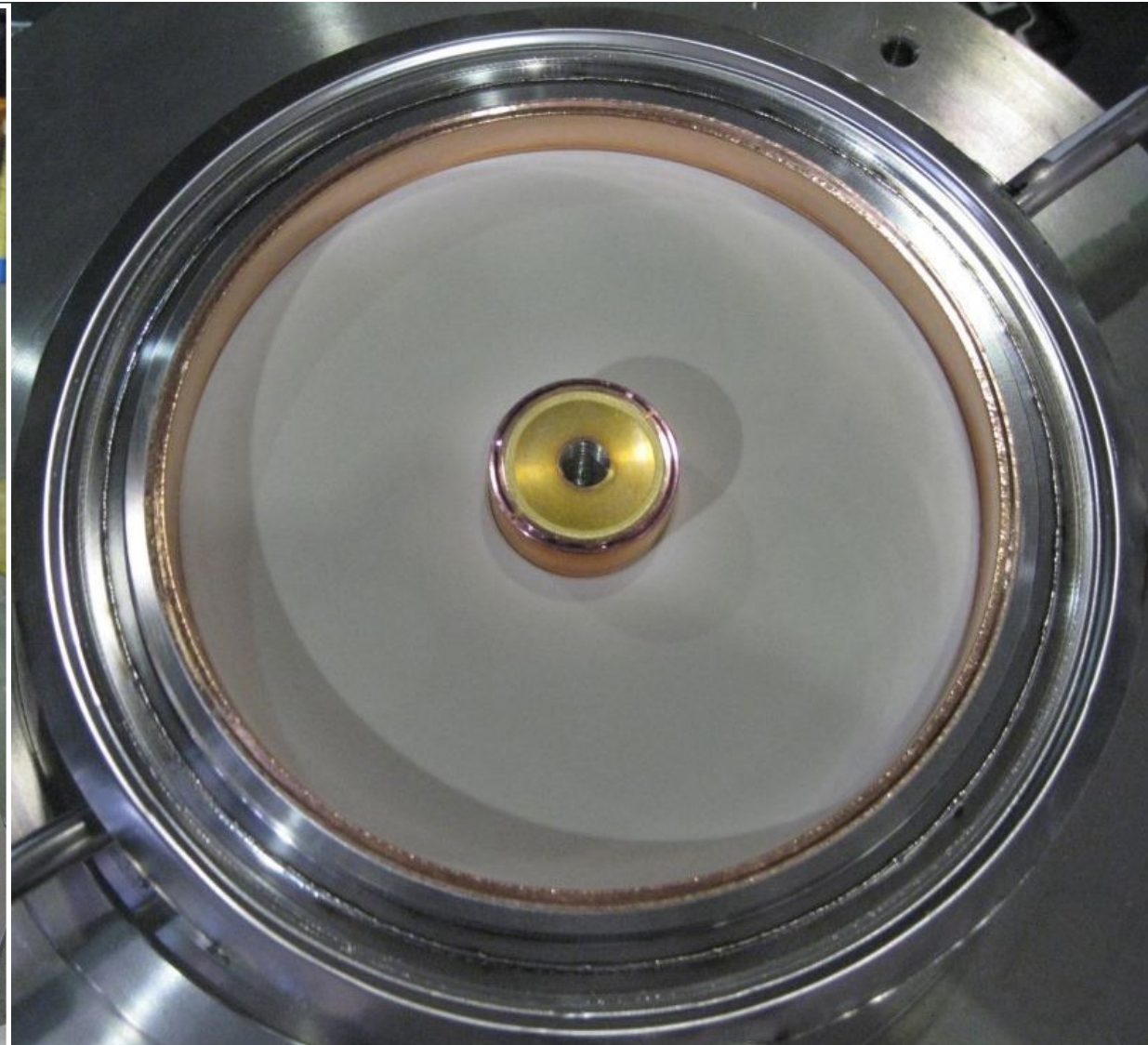
WRX15の同軸部水路の温度上昇が、従来機に比べ約2倍上昇している。  
 これも、従来機にあった高周波窓の中心を通していた内導体冷却用の水路を、分割構造にするため省き、外導体からループ部を通して、内導体も冷却している為である。



WRX15(入力側カプラ)の同軸部の水温変化

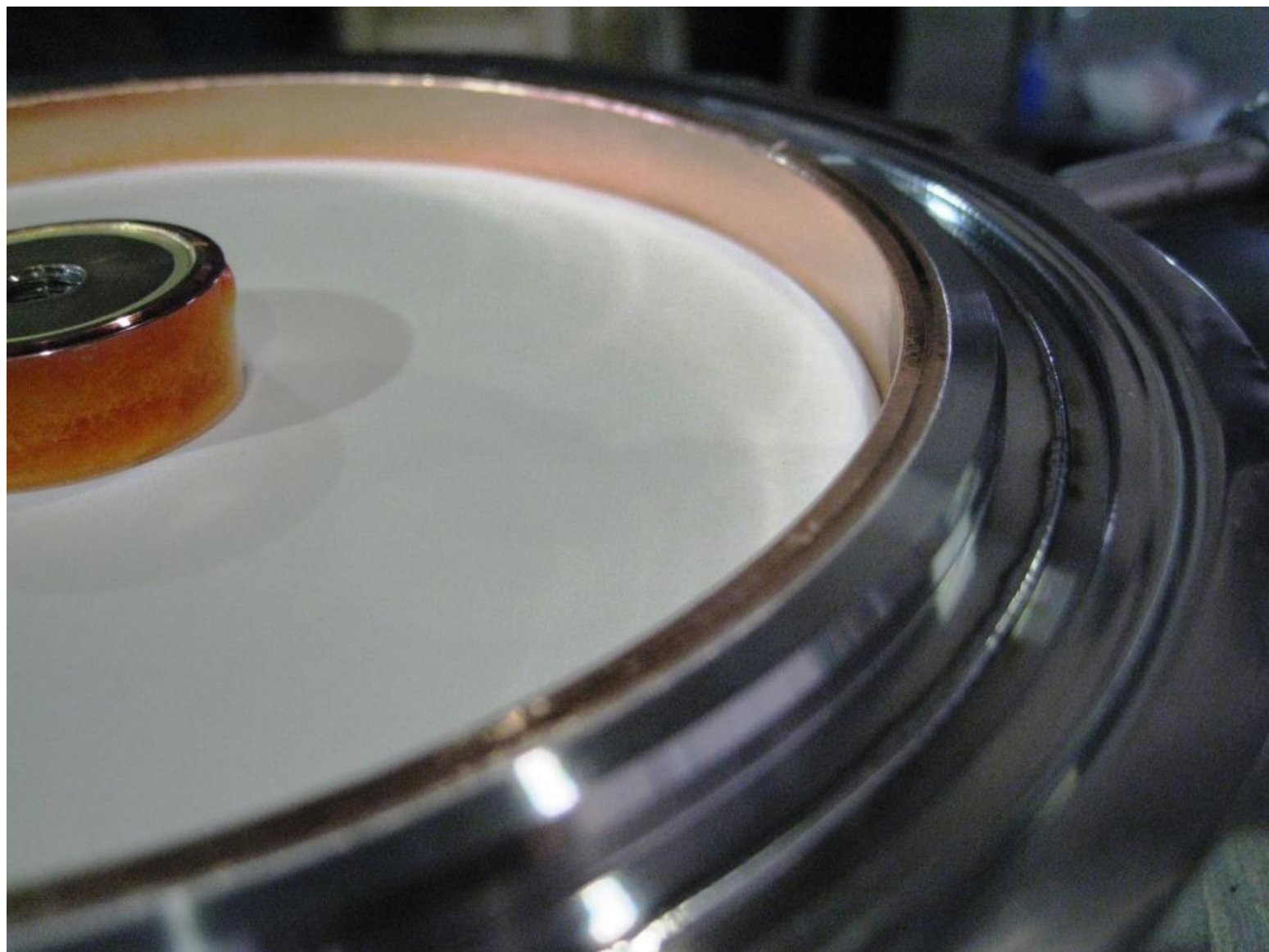


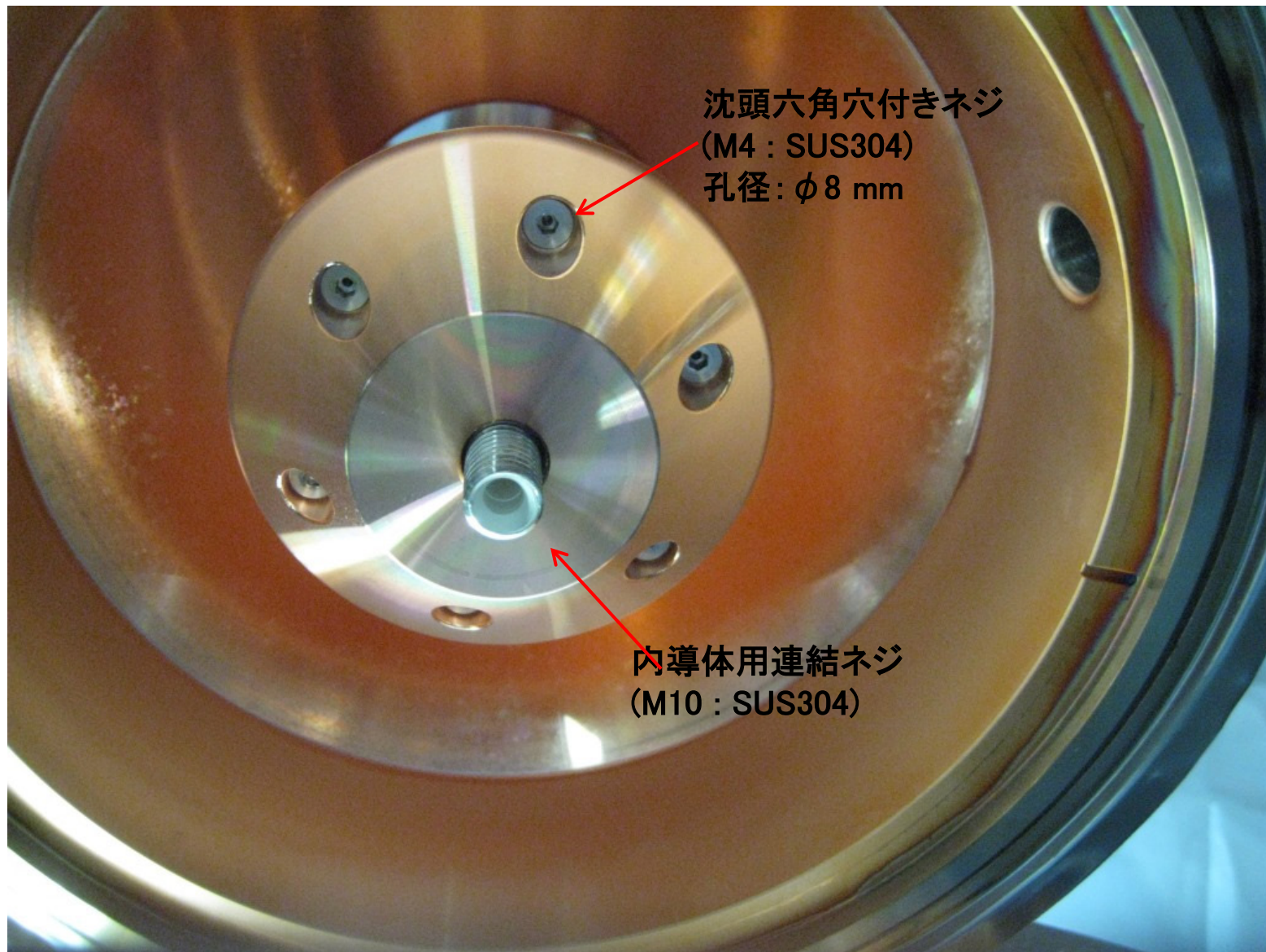
出力側カプラ(従来機)の同軸部の水温変化





# WRX15の分割時の窓側拡大

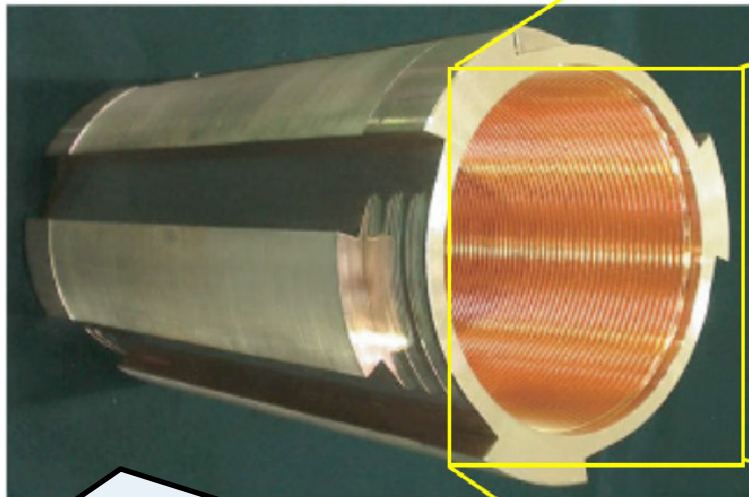




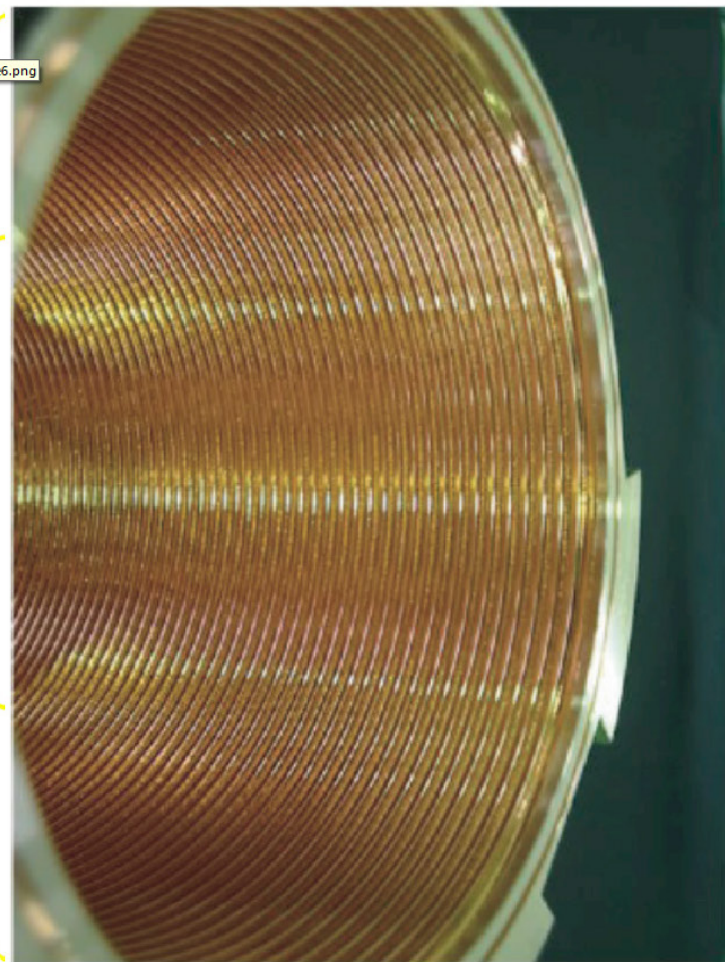


# WRX15脱着試験前





:Figures for SAP044:Figure6.png

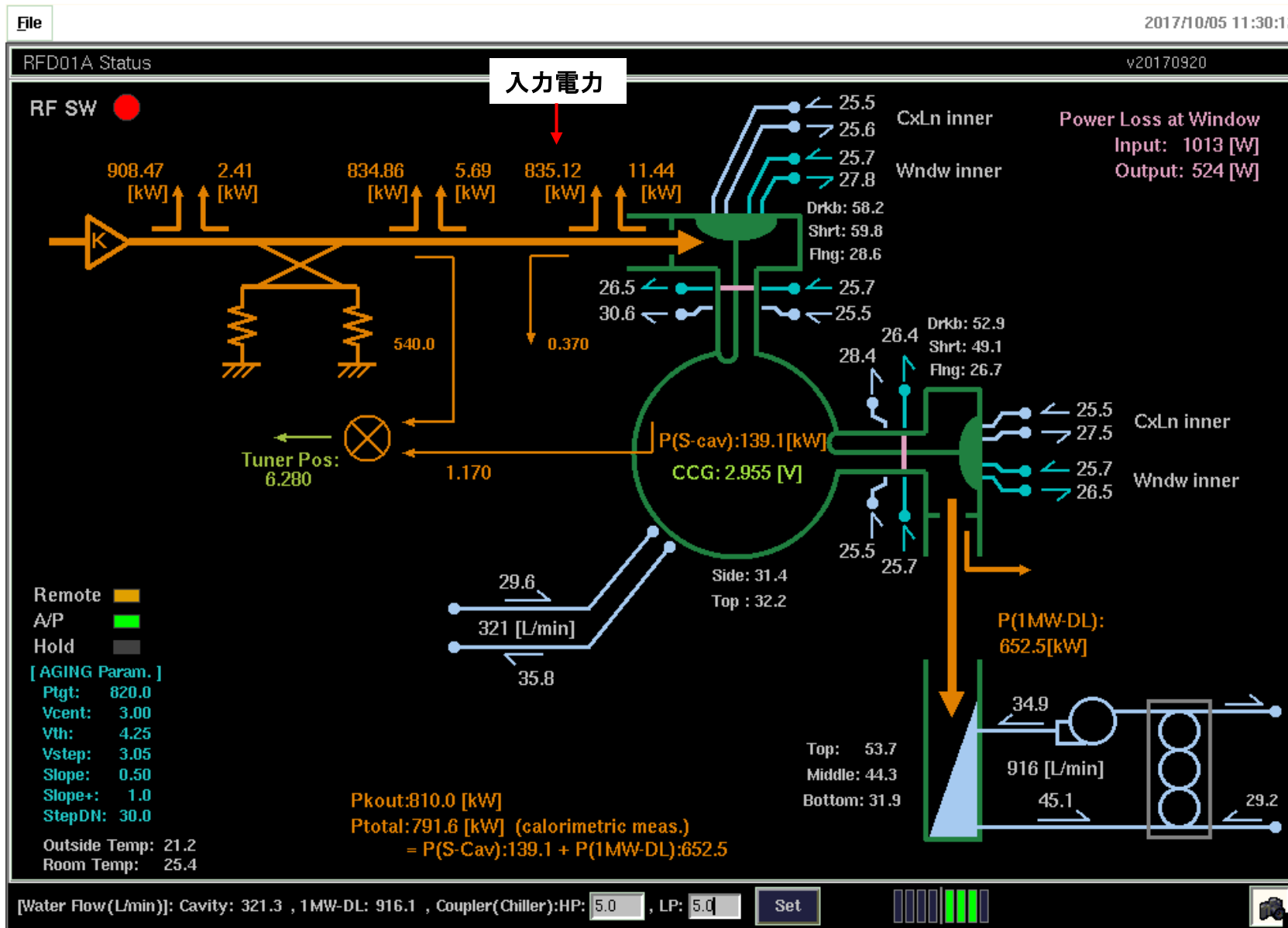


KEKBで運転に使用したアレス空洞 32 台中 2 台において当該マルチパクタ放電により給電電力を制限せざるを得ない事例が発生したが、微細溝加工を施したカプラに交換することにより問題は解消された。

参考文献： T. Abe et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 102001 (2010).



# 最大入力電力達成時の計測画面



# 同軸窓が脱着可能なRFコンタクト方法の検討

方法

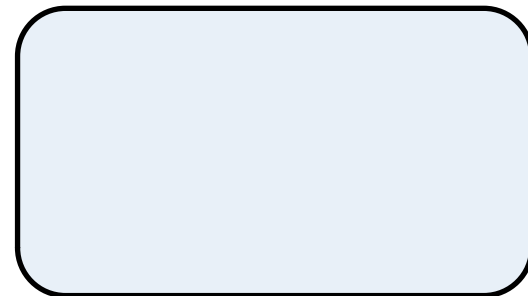
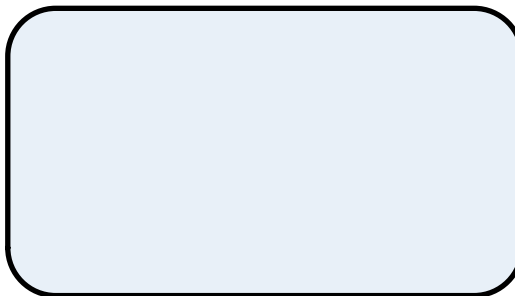
インナーコネクタ  
((株)ソルトン  
旧マルチコンタクト社製)

メタルシール  
(サンリーメス I)  
(三菱電線工業(株)製)

ボルト・ネジの軸力方式

実績

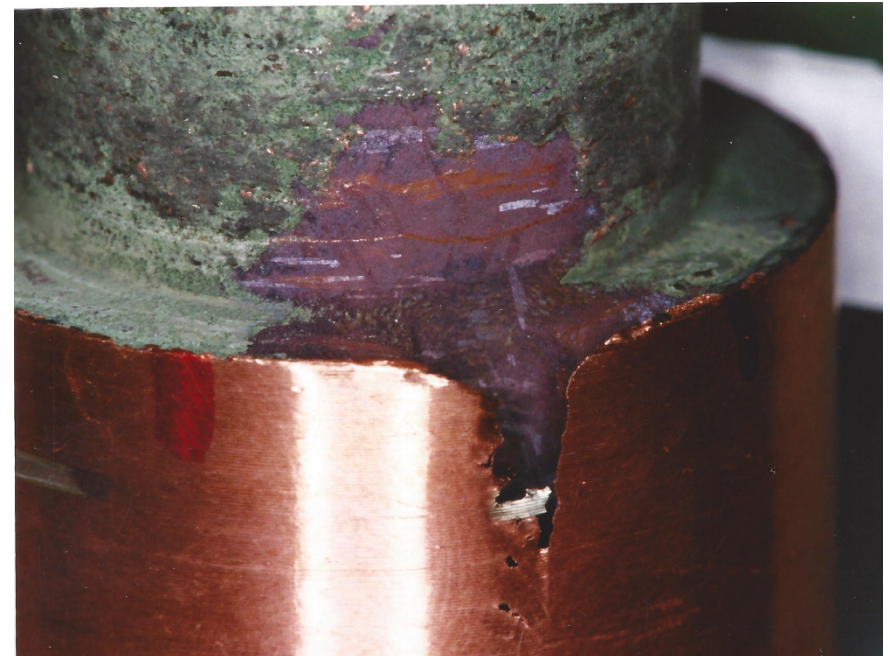
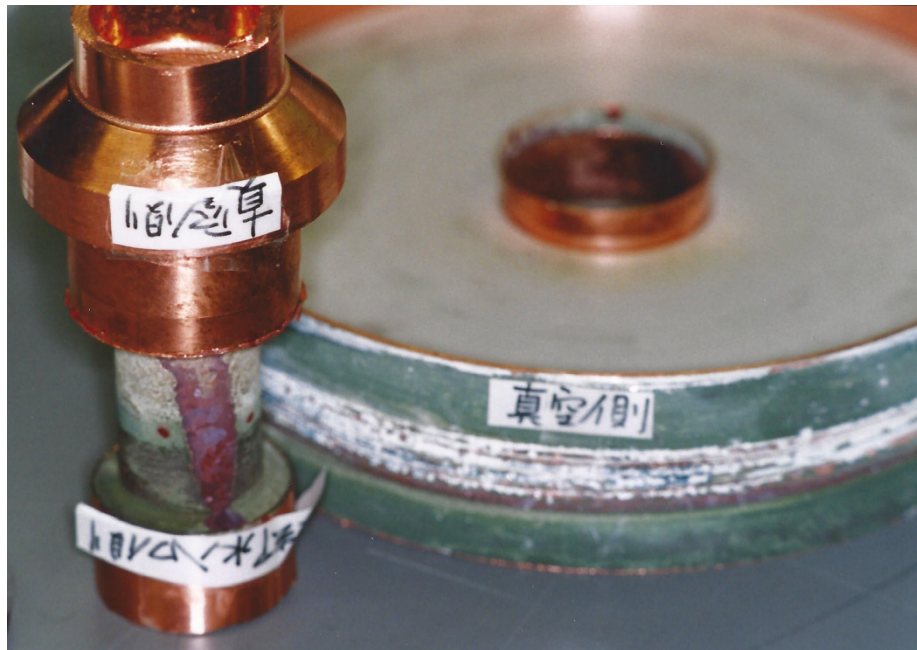
・IFMIF/EVEDA  
RFQ用カプラ  
200 kW(14秒のCW運転)  
・SASE-FEL 476 MHz  
空洞用カプラ



採用

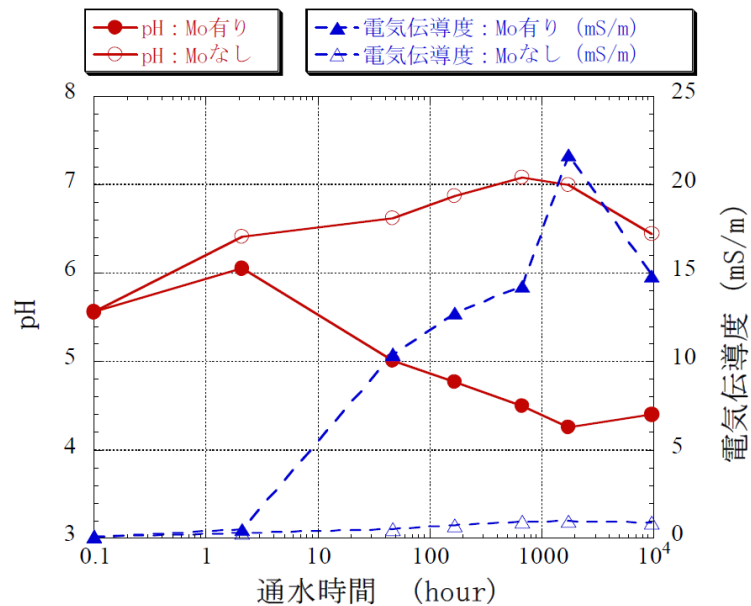
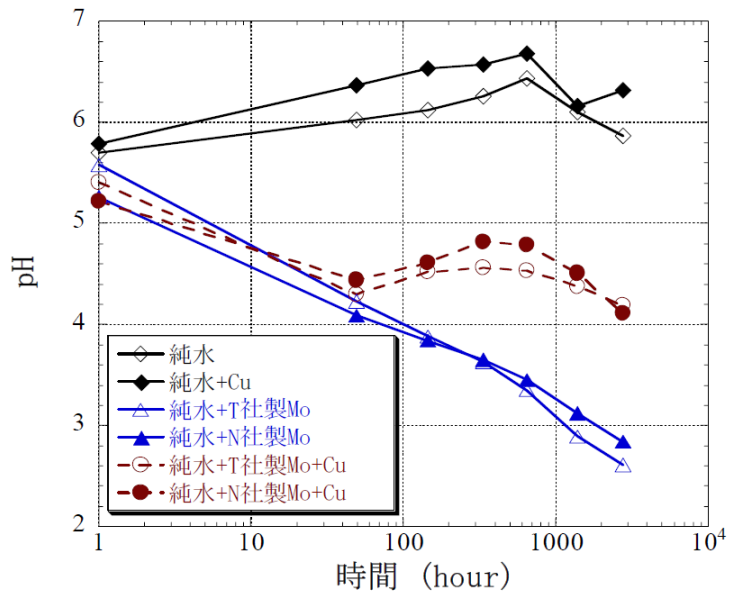


800kW-CW の高い電力で、真空中の内導体組立ネジについても、冷却が可能なことを、事前に解析で確かめた。



1台のユニットクーラーシステム(冷却水は純水)に配管接続された入力結合器および結合空洞減衰器において、高周波窓冷却水路内で真空リークを伴う腐食現象が発生(2001年1月のKEKB運転時)。

# モリブデンを使った窓水路の腐食2



純水、Mo、Cu のビーカー実験。Mo の影響で pH が下がる。Cu があると、pH は 4~4.5 に落ち着く。

ユニットクーラーを用いた再現実験。Mo 有りの条件では、冷却水の pH が 4~4.5 に下がる。

**再現実験の結果、水路に接液しているモリブデン治具により、冷却水の pH の低下と銅表面での析出物発生を引き起こすことが分かった。そして、これらが銅の腐食現象に影響を与えていると考えられる。**

**応急対策として、純水に防錆剤(ブルークールS、5%)添加して、pHの低下を抑えた。以後、運転時の水路の腐食による真空漏れは起きていない。**