

# EUV光源用ERL/FELにおける超伝導空洞の技術的課題と開発の進展状況

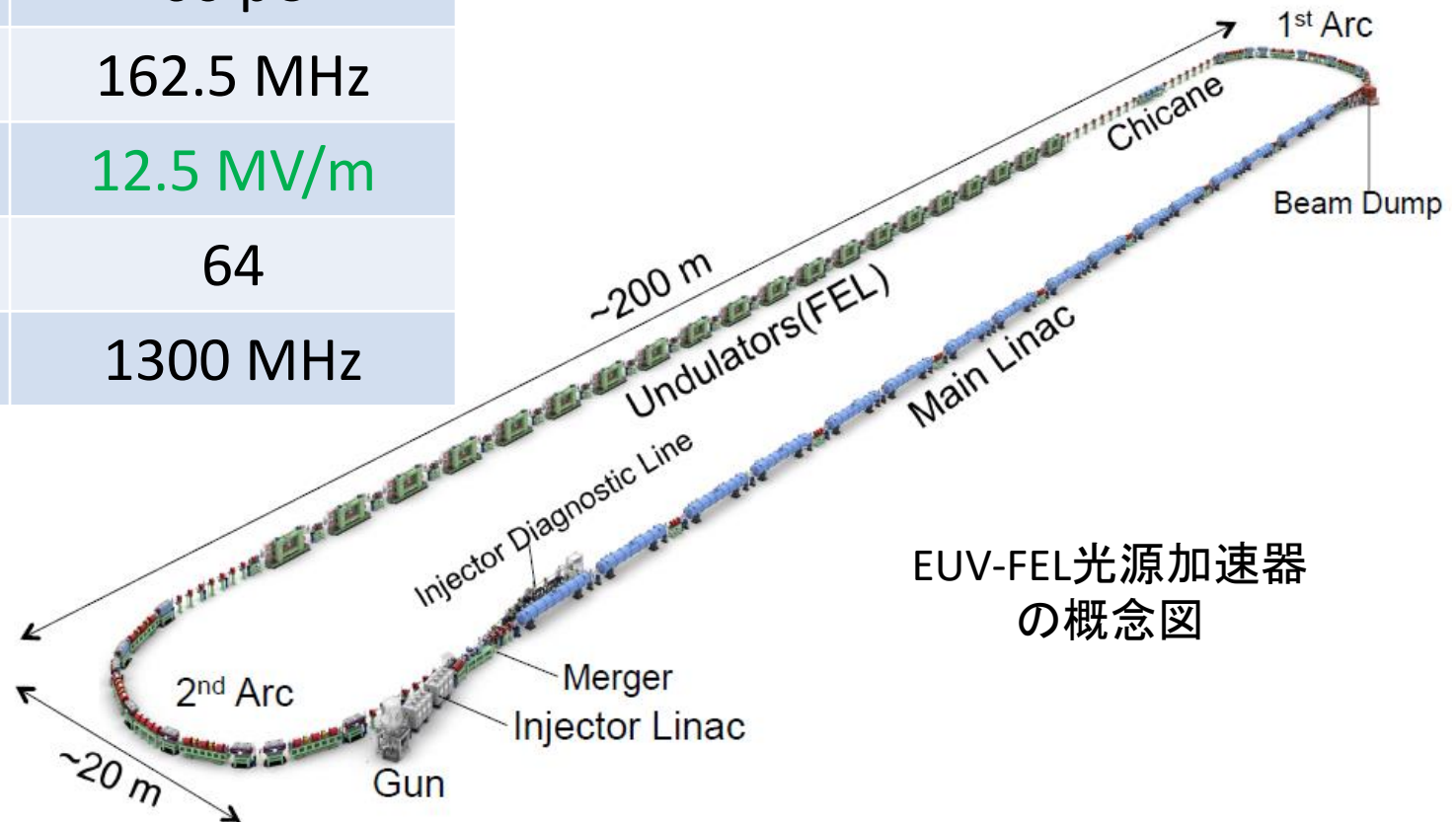
2016年5月31日

cERLミニワークショップ

梅森健成、加古永治、久保毅幸、許斐太郎、  
阪井寛志、沢村勝(JAEA)、太田智子(東芝)

項目	要求性能
波長	13.5 nm
出力	10 kW
ビーム電流	9.75 mA
ビームエネルギー	800 MeV/m
バンチ電荷	60 pC
バンチ繰り返し	162.5 MHz
加速勾配	12.5 MV/m
超伝導空洞の数	64
空洞周波数	1300 MHz

## EUV-FEL光源加速器 に要求される性能



EUV-FEL光源加速器  
の概念図

# 超伝導加速器に要求される性能

## • 加速勾配 $\sim 12.5$ MV/m

- Field emissionが十分抑制されていること。
- Q値は  $>1 \times 10^{10}$ とする。ただしhigh-Qが望ましい。
- 入力カップラー  $Q_{\text{ext}} = 2 \times 10^7$ だと4~5kWの入力パワーが必要

Cavity  
Input coupler  
Magnetic shield etc

## • ビーム電流 $\sim 10$ mA (x2 for energy recovery)

- BBUを起こさない事
- Monopoleによる発熱を対処できること

Cavity  
HOM damper etc

## • 冷凍機負荷

- 空洞1台  $\sim 15$ W  $\Rightarrow 15$ W x 64台 = 約1kW (@2K)
- Static loss 100W強 (@2K)

Cryogenic  
2K pipe etc

## • RF(振幅&位相)安定性

- cERLでは振幅:0.02% RMS、位相:0.02deg RMS 程度を達成
- EUV-FELでの要求は？

Tuner, (Coupler),  
Support structure  
LLRF etc

## • アラインメントの精度

- 1mm程度のアラインメント精度で良いのか？

Support structure  
Alignment monitor etc

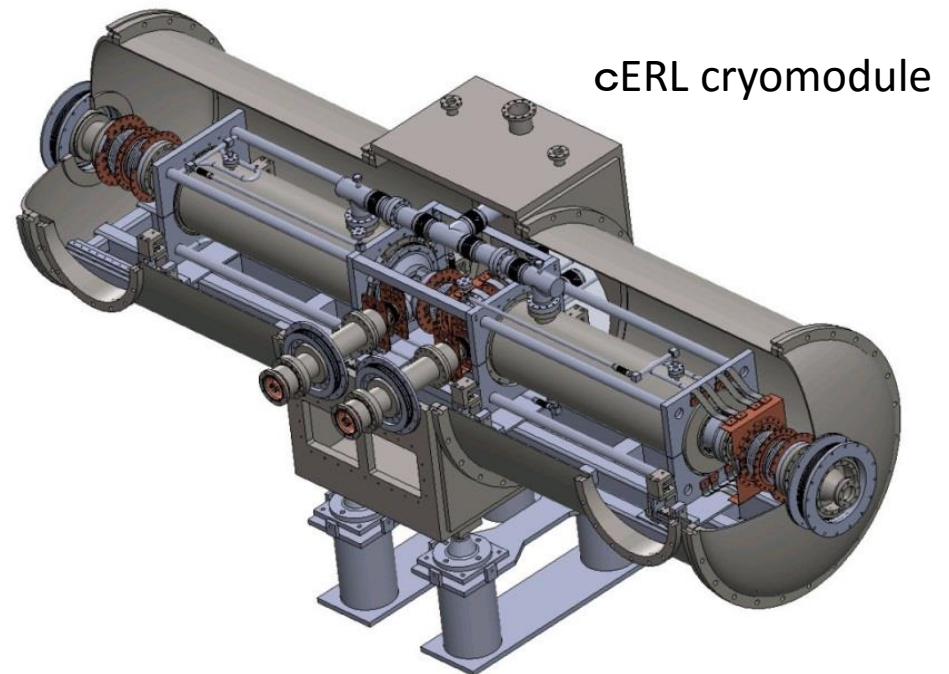
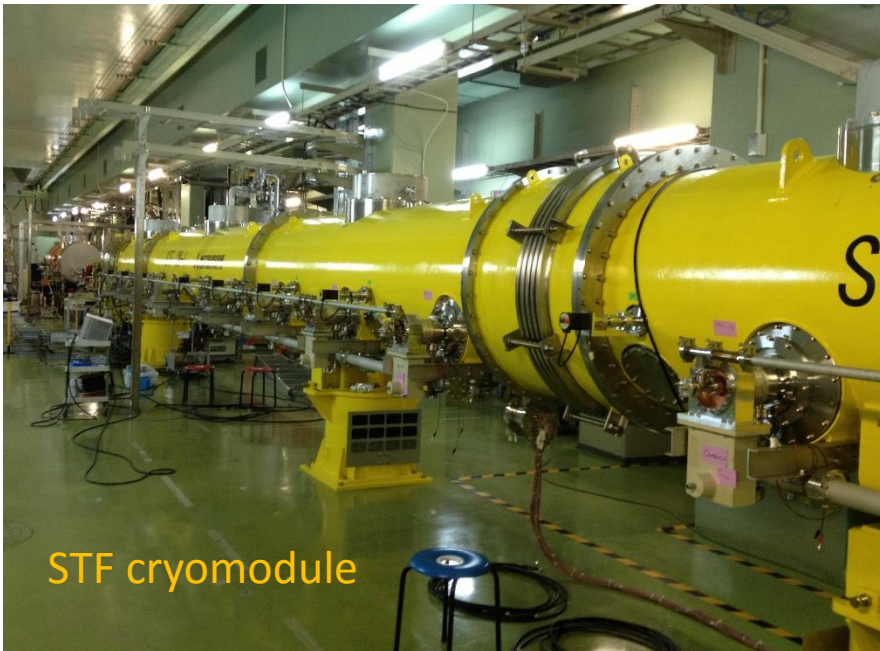
## • 運転における安定性

- Down timeは1%以下にすべし??  $\Rightarrow$  まずは、できるだけ安定に運転すること  
を目標
- 加速勾配を下げれば、安定性ならびに冷凍機負荷は減らせる。

Cavity  
Cryogenic etc

# クライオモジュール設計の方針

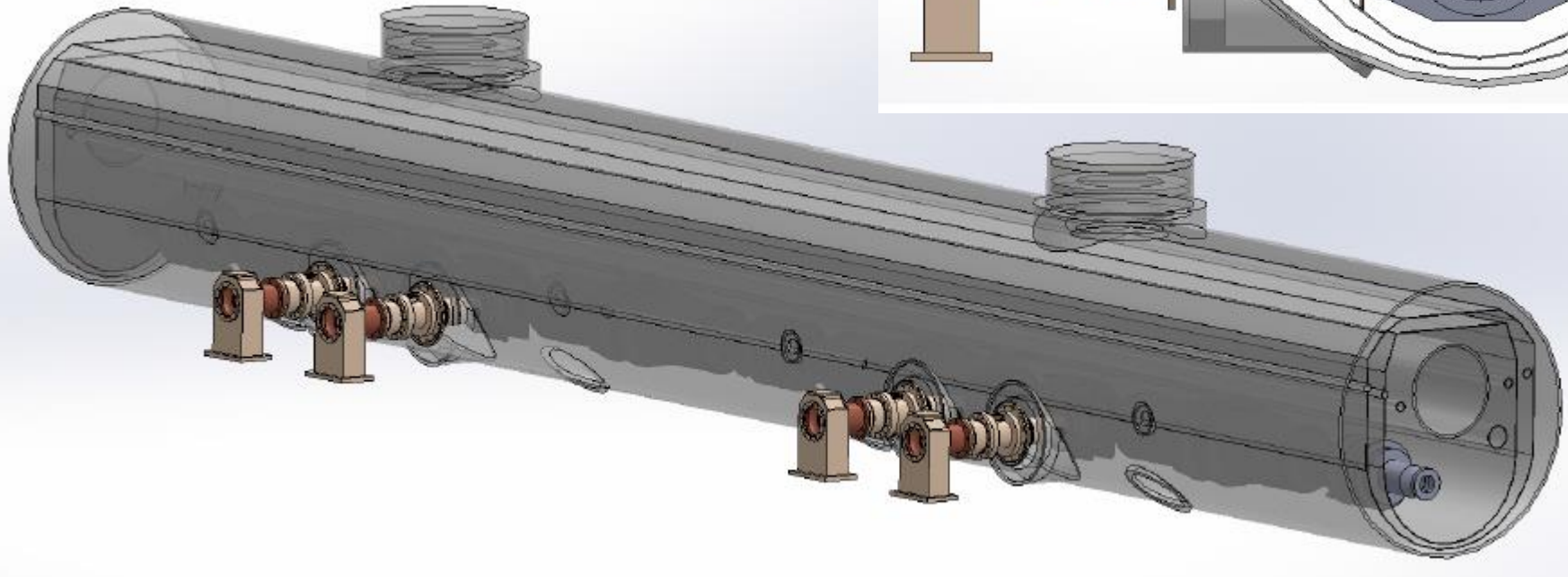
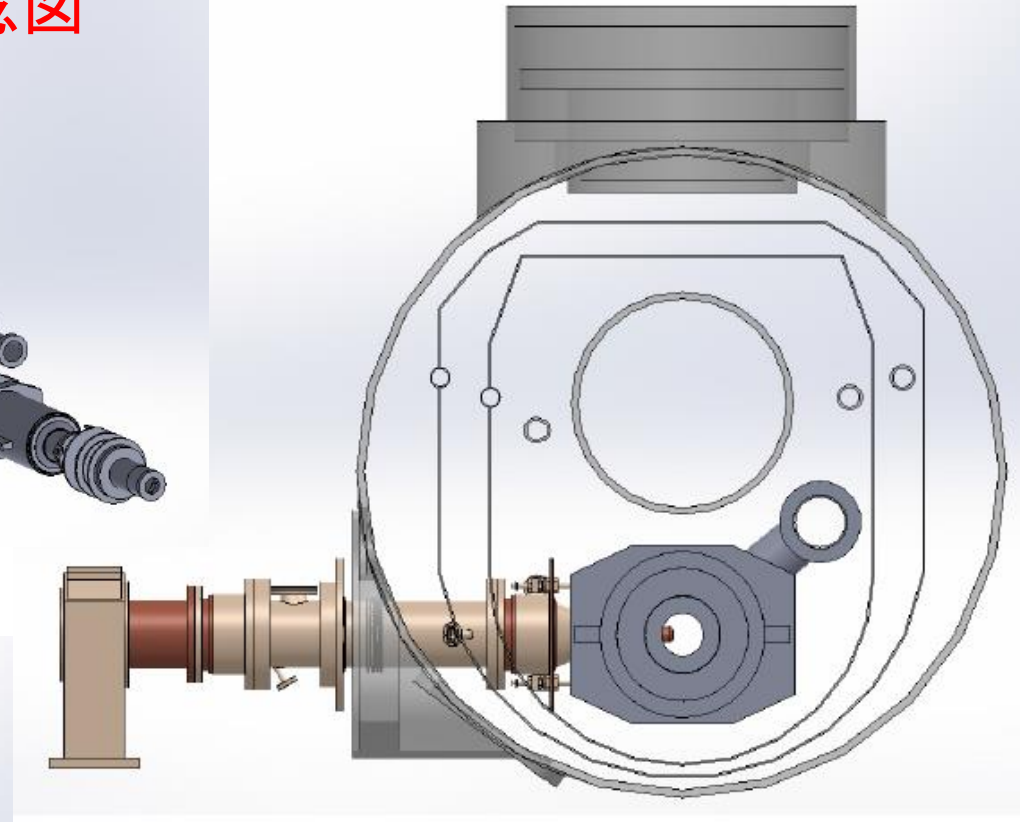
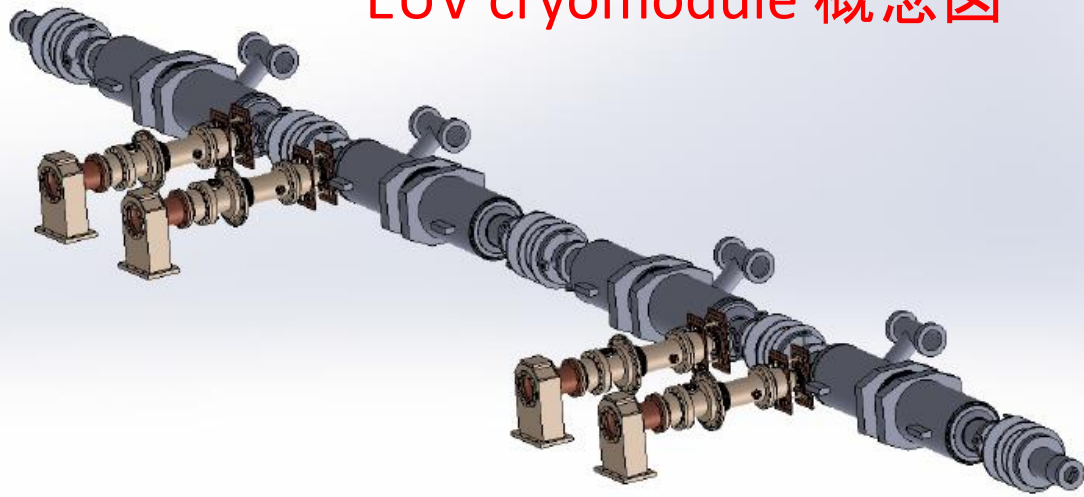
- STF型クライオモジュールをベースとする。
- CW対応として必要な部分は、cERLクライオモジュール他を参考にして取り入れる。
- 最終的にEUVクライオモジュールとして最適化を図る。
- できるだけ冒険は避け、実現可能性の高い設計とする。
- 4空洞入りのモジュールを基本とする
- 4空洞モジュール x 2で1ユニットとする



# STF/cERL ⇒ EUV cryomoduleの検討

	STF cryomodule	cERL cryomodule	EUV cryomodule
Cavity	TESLA-like 9-cell	HOM damped 9-cell	TESLA type with large beam pipes
Input coupler	Co-axial, double windows, pulse type	Co-axial, double windows, CW type	cERL type with some modification
HOM damper	TESLA type HOM coupler	Ferrite HOM damper	AlN(?) HOM damper with HOM antenna
Frequency tuner	Slide-jack tuner and piezo tuner	Slide-jack tuner and piezo tuner	STF / cERL (same) type
He jacket	230φ with magnetic shield inside	300φ	STF type
Support structure	Hanging from 2K return pipe	Support by table	STF type with some modification
Gate-valve	Manual gate-valve inside cryomodule	Gate-valve outside cryomodule	STF type with some modification
He liquid surface	He 2phase-pipe	Inside He jacket	STF type with larger chimney

# EUV cryomodule 概念图



# EUV/FELに向けたSRF開発の進捗状況

ここ半年程度の開発状況は以下の通り

- **超伝導空洞の設計**

- 表面電場を下げて、Field emissionを抑制したCW空洞の設計
- 最終のoptimizationを試みている。

- **HOM damperの試作、冷却試験**

- 窒化アルミのリングを製作
- 銅とのロー付け試験
- 冷却試験

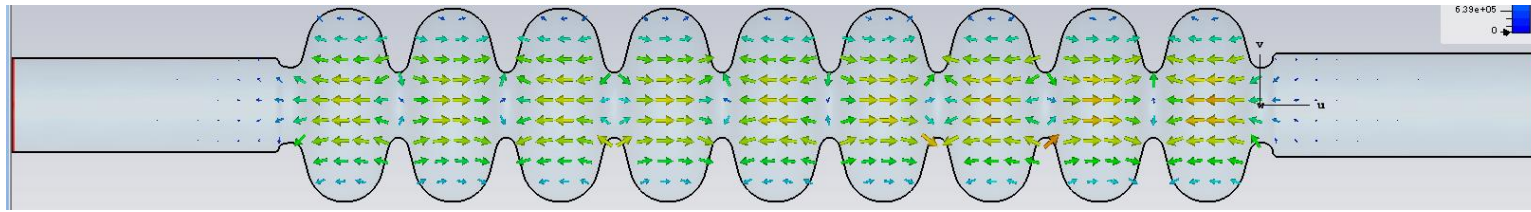
- **Input couplerの大電力試験**

- (He processに備え)大電力試験を試みた

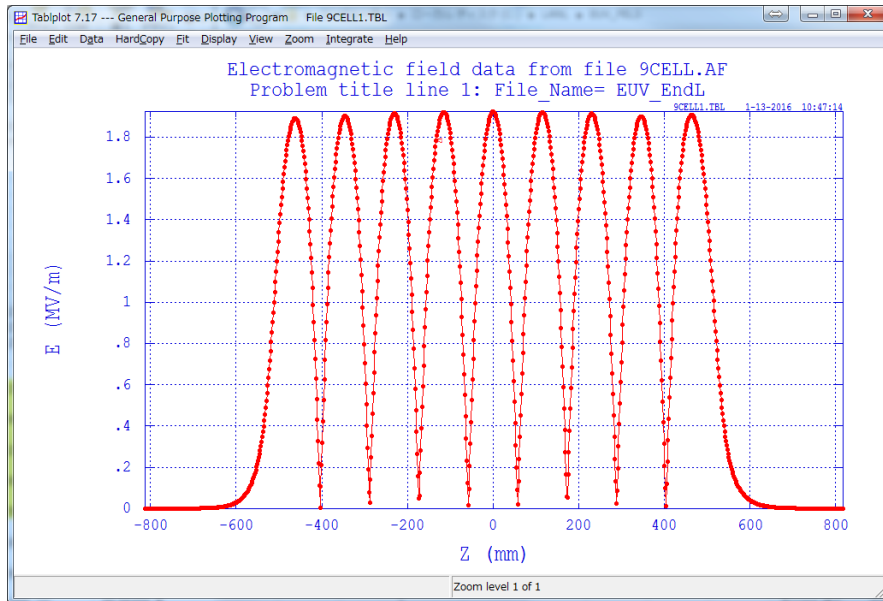
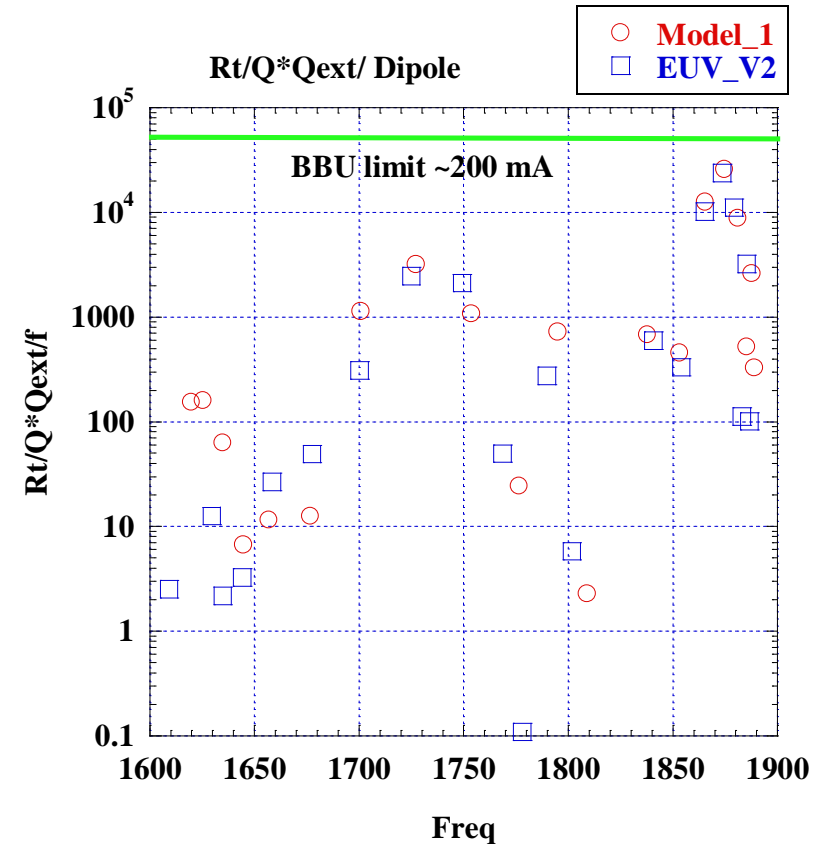
- **横型クライオスタットの整備**

- 「機構長の認めるX線発生装置」として申請 & 準備中
- 順調に行けば、6月に最初の大電力試験
- 秋以降、STF空洞を用いてアセンブリ技術の向上に努める

# 最終候補のパラメータ - 加速モード & Dipole HOM



Parameter	CST Value	Superfish Value
Frequency	1300MHz	1300.06252 MHz
R/Q	1007.5 Ohm	1003.134 Ohm
Geometrical	260.93 Ohm	270.351 Ohm
Ep/Eacc		2.04384 MV/m
Hp/Eacc		3386.18 A/m

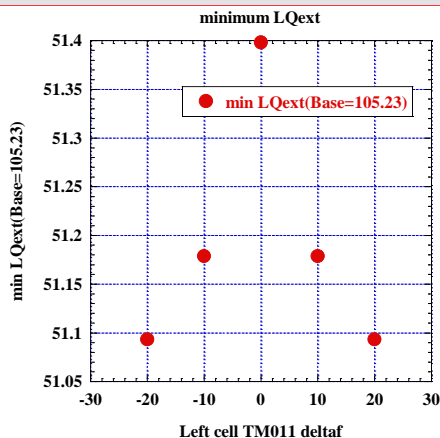
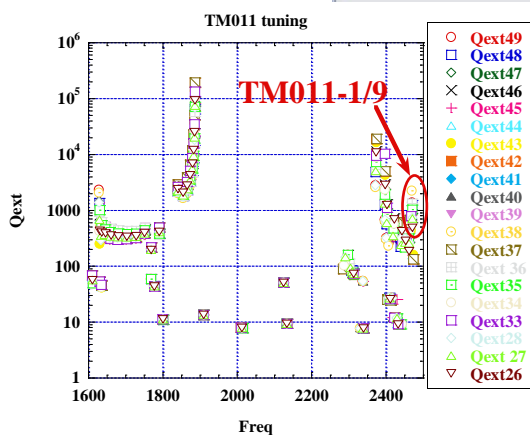
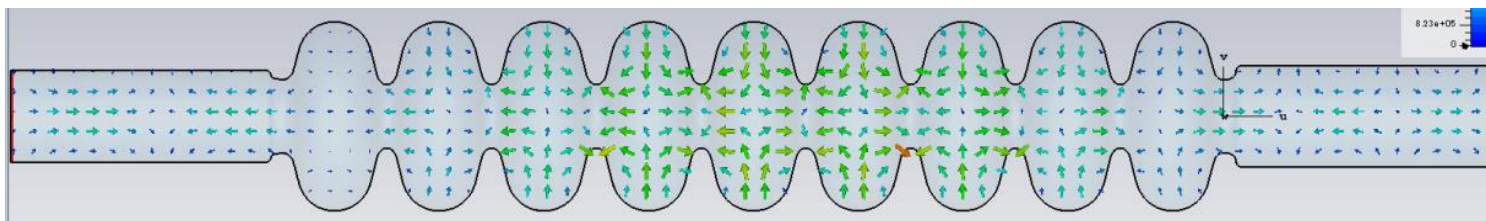




# Right & Left End Cell TM011の調整の例

- EUVの設計ではTM011を最適化することが最優先課題である。
- TM011で最大R/Qは1/9 modeのR/Q=161 (Ohm)である。
- 両側セルの調整が可能であるため左右のEnd Cellに対する応答を見てみる。
- R/Qの周波数に対する応答は小さく、また周波数に対するQextの変化量も小さい。

TM011-1/9



## End Cell単体のQextの調整について

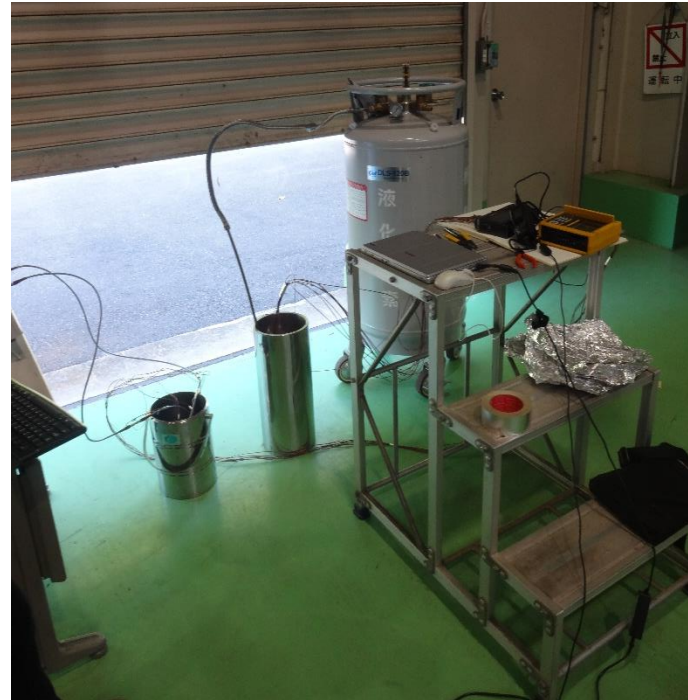
Tuning Curveから推測したLeft Cellの最小Qext  
周波数を変えてもほとんど最小Qextに変化はない。  
周波数の調整にアイリス径の調整が不要なため。

⇒9Cellの最小Qextの推測には、CSTで計算した結果を使えば良い。

- EUVではビーム繰り返し数が数10～100MHzになることが想定されるので、できるだけそのインピーダンスを下げるように努力する。
- TM011に対して最適化を図る方針で最終形状の調整をしている。

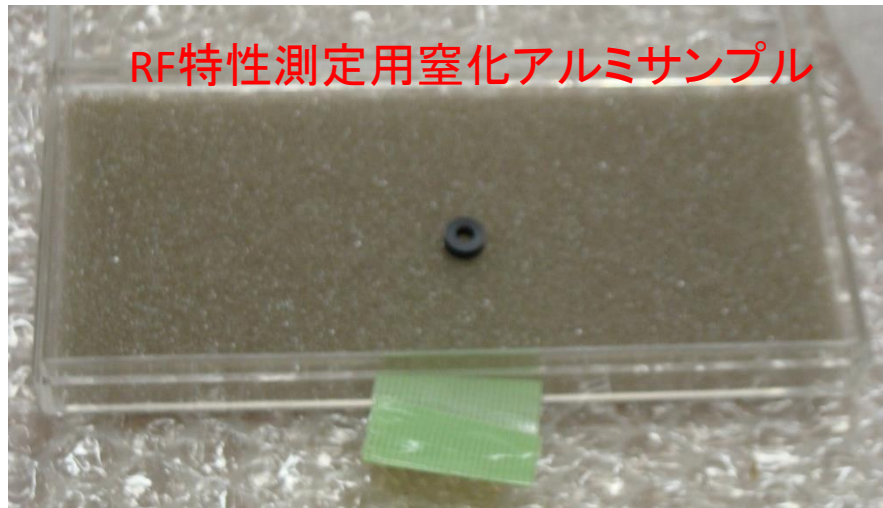
# HOM damper 開発

- アメリカ・Siennatech社より窒化アルミ(lossy)のリングを購入
- 銅へのロウ付け試験、ならびに冷却試験を行った。



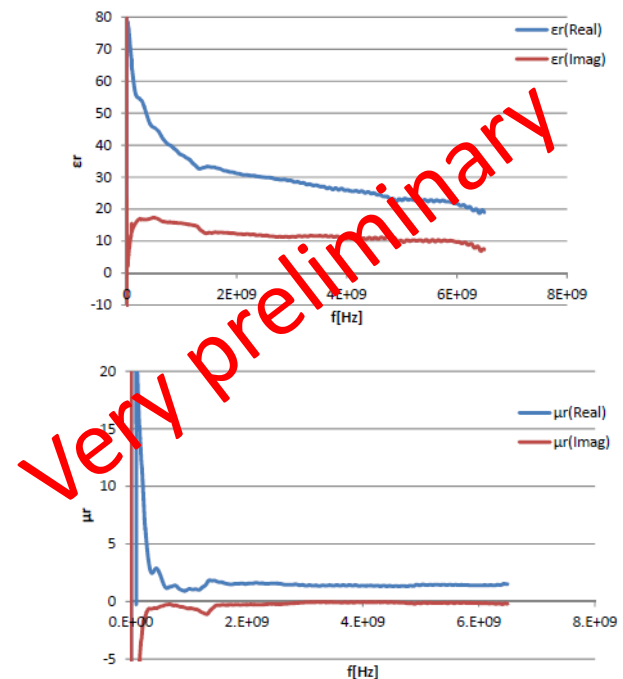
- 冷却試験後、ヒートガンで暖めたところ、窒化アルミが分離した。
- しっかり接合されていなかった。
- ロー付け方法は検討する。

# 窒化アルミの低温測定(80K)



- 80Kにて窒化アルミの特性を測定
- 測定方法、校正、解析方法にはまだ改善の余地がありそう。
- 少なくとも6GHzまでは、それなりの吸収特性を持っていそう。

STL-150Dの誘電率と透磁率@80K('16/05/20)



株式会社 太田  
'16.05.25

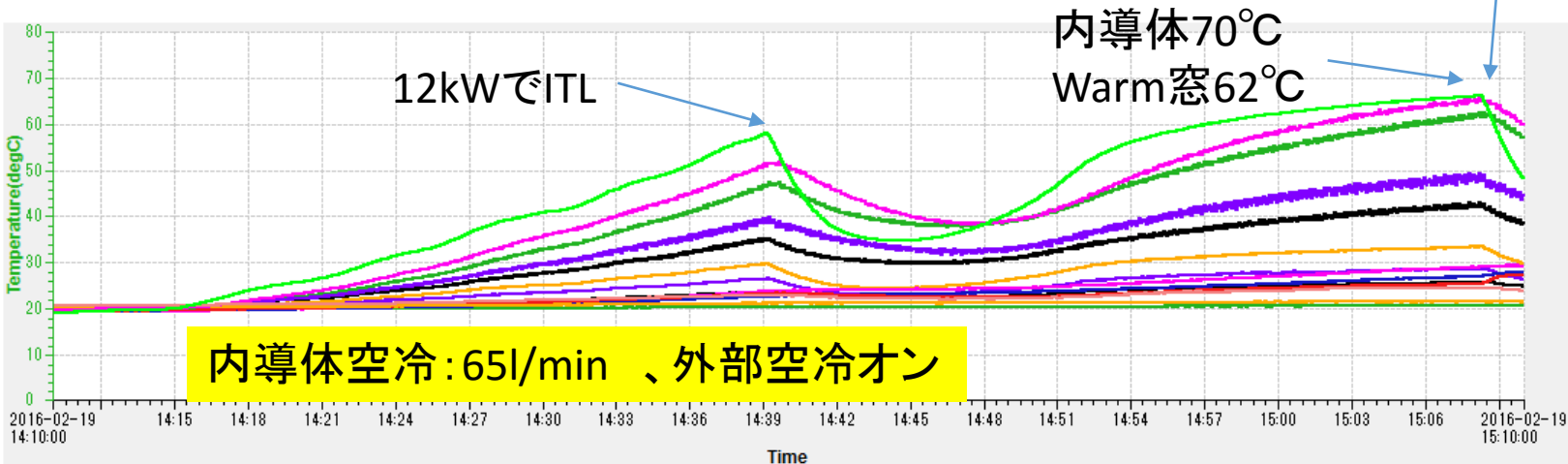
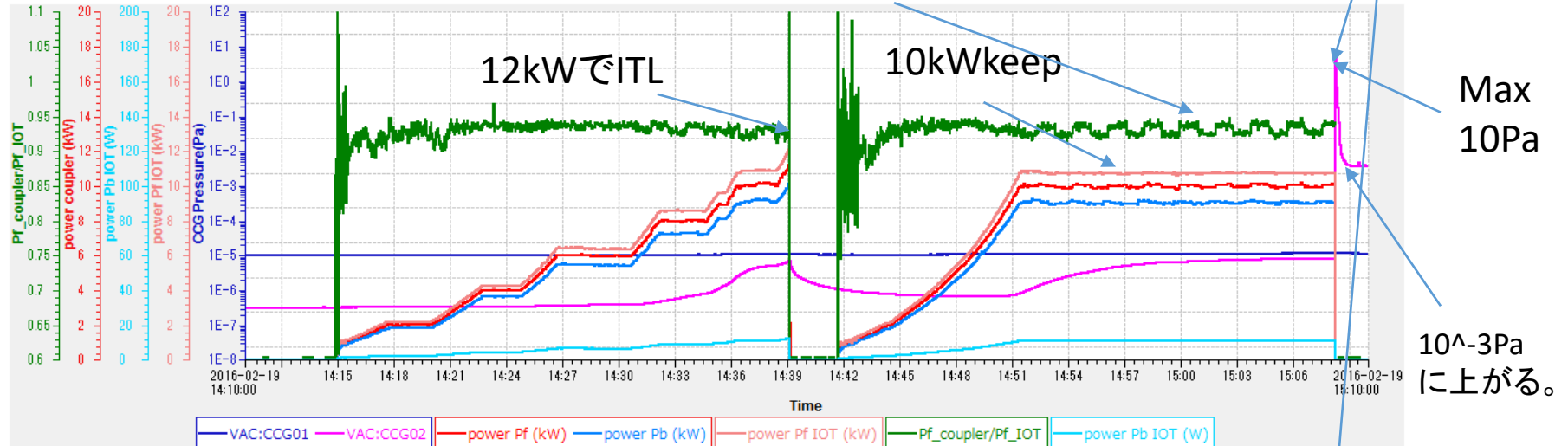


# (He processに備えた) Input coupler大電力試験

- 11.5kWまでのエージングが進んだので、CWに運転モードを変えて最後に熱負荷checkを行う。
- 10kWで20分keep後warm真空、& arc③ITL、warm窓側の真空の大リークが起きる。

Pf\_coupler/Pf\_IOT ratio変わらず

Warm真空 & arc③ ITL

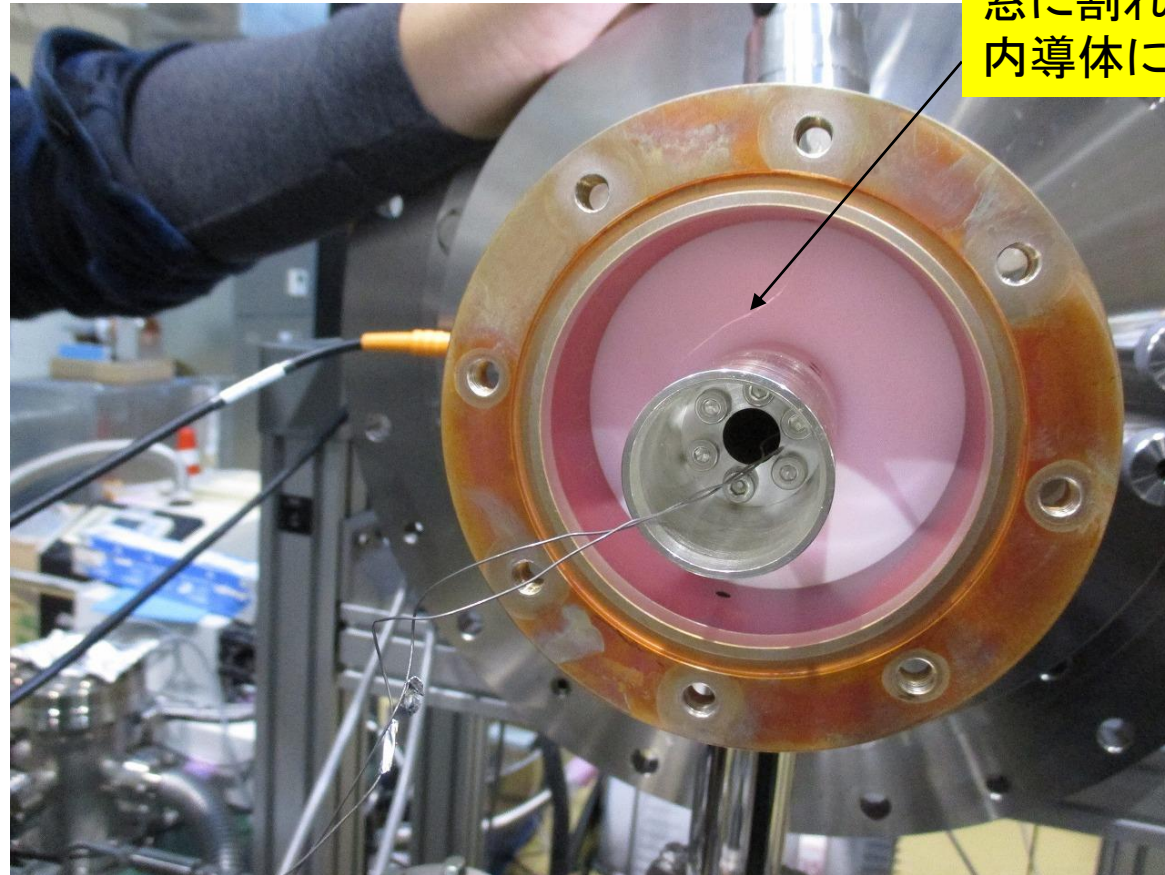


内導体空冷: 65l/min、外部空冷オン

内導体70°C  
Warm窓62°C

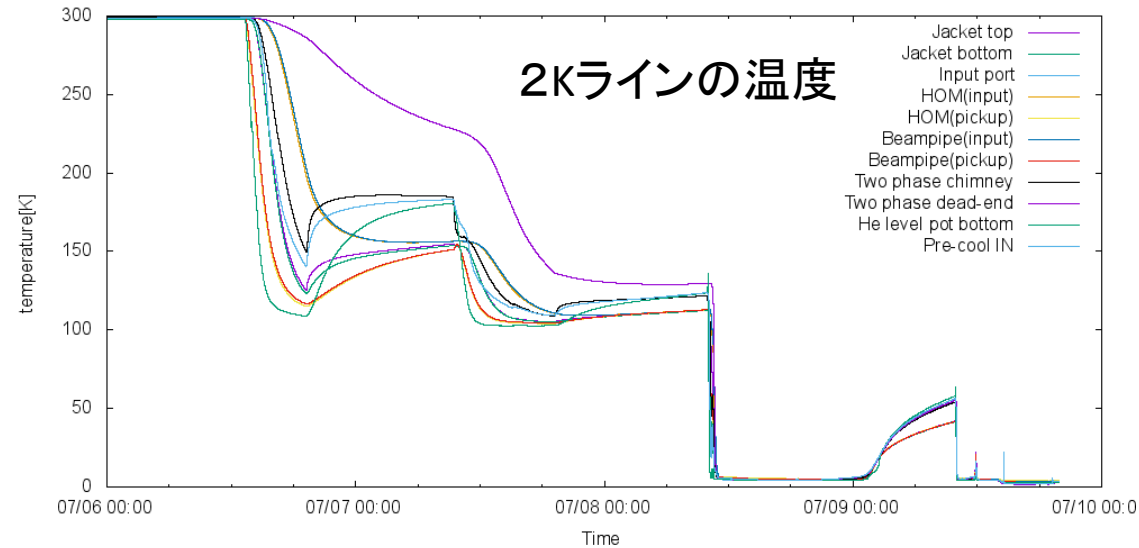
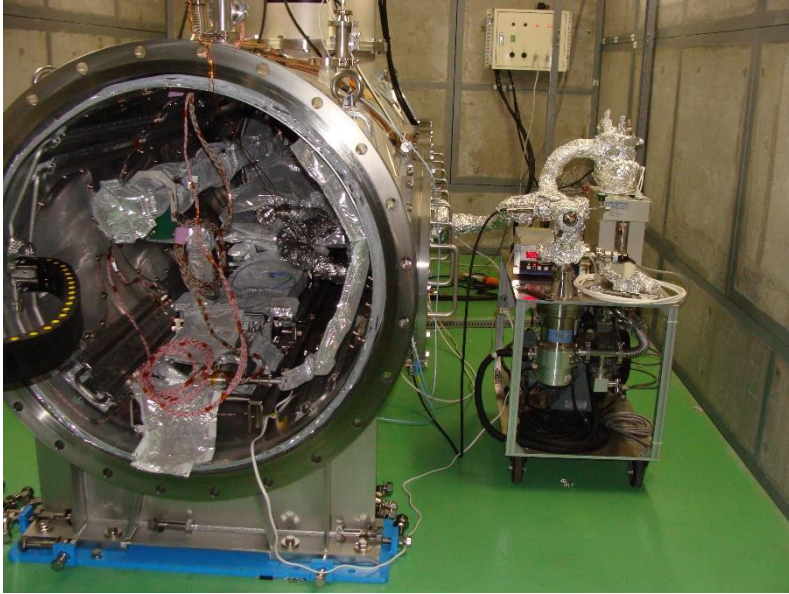
# warm窓でリーク

窓に割れが見られた。  
内導体には直接亀裂無



- cERLのカップラーはうまくいっていたが、放射線対策として、ドアノブ部でこれまで使用していたテフロンをサポートを省いた。
- そのため、ドアノブの熱変形が直接内導体に伝わり、セラミック窓に過大な応力がかかったのではないかと推測。
- セラミック窓とドアノブを製作し、再び性能評価を行う必要あり。

# 横型クライオスタットの整備



- 多少のトラブルはあったものの、冷却試験は順調に進んだ。
- Heジャケット付きSTF空洞は既にインストール済み
- 現在、「機構長の認めるX線発生装置」として申請中
- 6月中に最初の大電力試験を予定
- 秋以降、アセンブリ技術の向上のためのR&Dに寄与する予定。

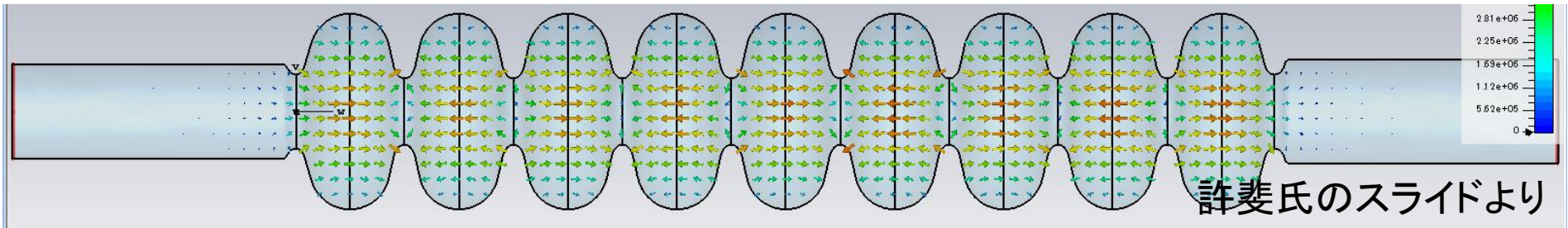
# まとめ

- EUV光源に向けての設計・開発を進めている。
- 空洞はTM011にターゲットを絞って、空洞形状の最適化を試みているところ。
- HOMダンパー開発用には、窒化アルミを購入して、R&Dを開始した。まずは、ロー付けに関して改善を図る。
- 入力カップラーは大電力試験で窓が割れた。ドアノブ部のテフロンでのサポートに関して要検証。
- 横型クライオスタットの整備を進め、機構長の認めるX線発生装置として申請を進めている。
- モジュール設計がここ半年ほどあまり進んでいないので、今後こちらを進めていく。

Backup slide



# Cavity with He jacket



- 現在、空洞形状を最適化中(10/8 EUV光源打合せ・許斐氏の発表資料参照)
  - Center cellはTESLA形状
  - ビームパイプ径は110φと100φ
  - 両エンドセルの形状を最適化する
- BBUに関しては200mA近い閾値となるはず
- MonopoleのHOMのインピーダンスを下げるべく最適化を行う。
  - 最後はビーム繰り返し周波数で逃げる
- $E_{peak}/E_{acc} \sim 2.0 \Rightarrow$  field emission freeで安定な12.5MV/mでの運転を実現する
- He jacketの径はSTFの230φを踏襲  $\Rightarrow$  高圧ガス保安法は一般則で通す

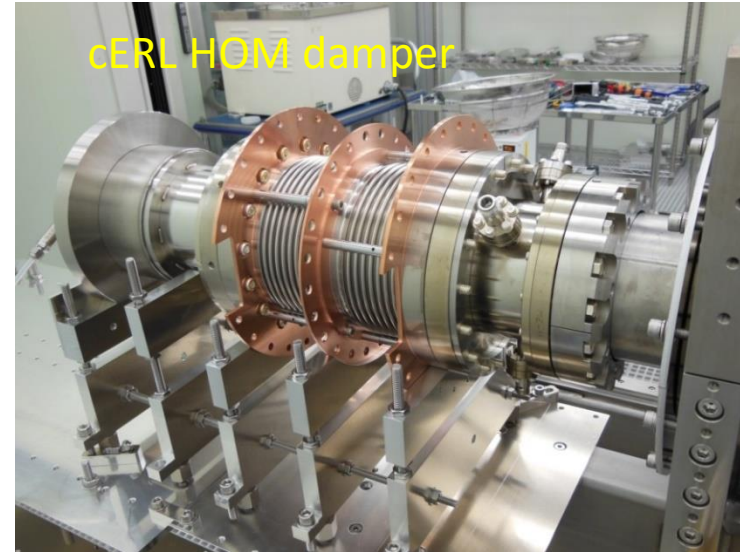
## Input coupler

- cERL couplerを基本とする(もともとはSTF couplerのCW版)
- 内導体は窒素ガスで冷却
- STF cryomoduleに配置してみるとやや大きい感じなので、コンパクトに改良することを検討。
- $Q_{ext}$ は $2 \times 10^7$ 程度を想定。
- ただしHigh  $Q_{ext}$ での運転、およびlow  $Q_{ext}$ でのpulse agingなどを考慮して $Q_{ext}$ の可変範囲を検討する。



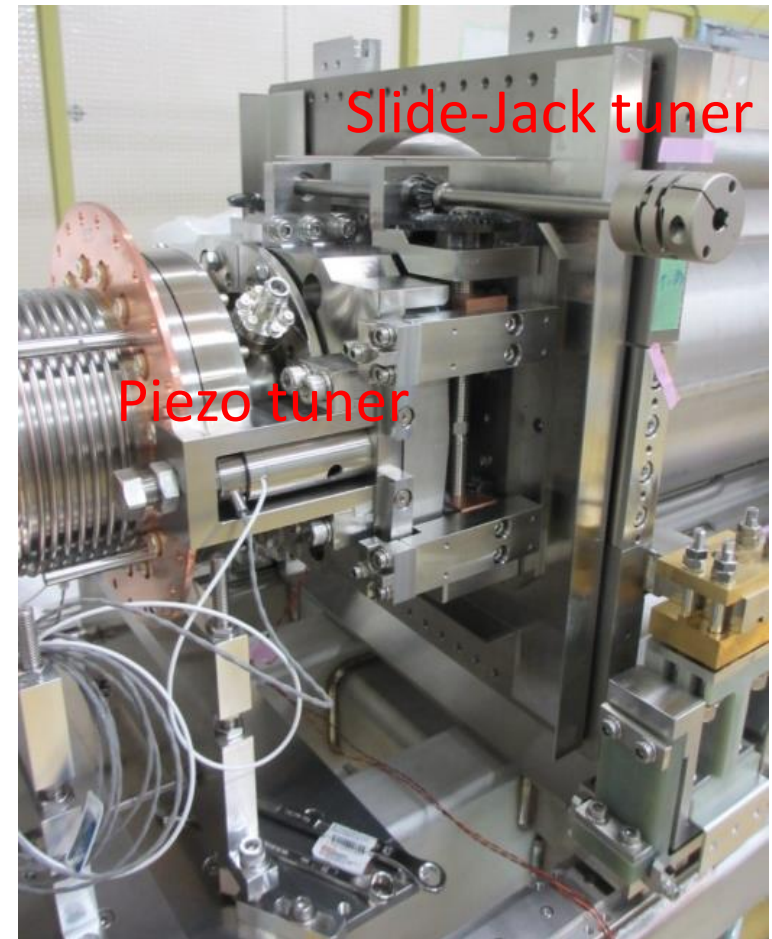
# HOM damper/coupler

- HOM damperとHOM couplerを併用する。
- 窒化アルミを用いたHOM damperの開発を進める(10/6 EUV光源打合せ、東芝・太田氏の発表を参照)
- (第1号機は)短期間での開発が要求されるため、HOM damperの開発をできるだけ簡略化する。
- Broad band & high power対応を一部犠牲にして、コンパクトなHOM damperをまずは開発
- 足りない部分は、HOM coupler(アンテナ型)で補う
- 真空中でのRFケーブルでの大電力の取り出しについてはJAEA・沢村氏のR&Dにより目途が立ちつつある。
- HOM damper/couplerの最適配置、熱設計等は今後の課題。
- 窒化アルミ(米・Sienatech社)を入手し、ロー付けの試験を今期行う予定。



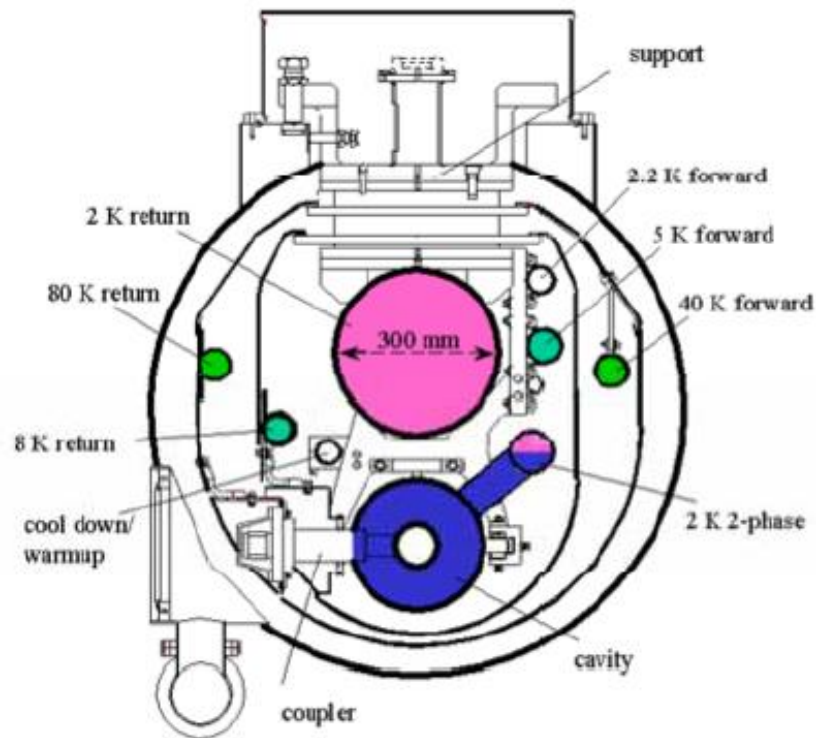
# Frequency tuner

- 粗調整用のslide-Jack tuner  
および微調整用のpiezo  
tunerともに、STF、cERLで問  
題なく動作している。
- 基本的にこのまま用いる。
- Piezoは故障時の事を考慮し  
て1空洞あたり2か所に設置
- また故障時、交換可能なよう  
に、断熱真空槽にポートを用  
意する(現在もそうなってい  
る)



## Cryomodule(TESLA/STF moduleの場合)

- 断熱真空槽上部からのサポートポストで吊るした300φの2K He回収配管を空洞のサポート構造として用いている。
- 空洞は2K回収配管からぶらさげられている。
- He液面は2K He 2相配管の中央あたり。
- 80Kシールド、5Kシールドを持つ。



DESY-TEsLA-TYPE-III  
クライオモジュール断面図

OHO 06 大内氏スライドより

# Cryomoduleの改良点、検討課題

## • 2K回収配管

- 300φの径は、ILCで2.5kmにわたって約1200台(?)の空洞からの約4kW(?)の回収ガスに対し、圧力損失を一定レベルに保つような配管系が選ばれている。
- EUVでは、むしろ構造体としての強度から配管径・形状を最適化できるか？

## • He jacketから2相配管へのチムニー

- CW運転では、ここが熱伝達を制限する ⇒ 大口径化がCWでは必須

## • 5Kシールドの簡略化

- 5Kシールドを簡略化してもstatic lossがあまりかわらないという議論があるので、可能であれば簡略化。

## • High-Qを目指した設計

- 磁気シールドの強化
- 冷却方法、冷却速度の最適化。予冷ラインの複数化(冷却時の温度勾配の最適化)
- またそれを制御するためのセンサー類の強化。

## • ゲートバルブ

- 真空中に置いた場合、大電流ビームによる発熱の可能性があるので、必要に応じて冷却を検討

## • アライメント

- ワイヤモニター(STF型)? レーザー?(cERL型) トランジット?
- 冷却後、アライメントのずれが判明した場合の対処方法

## He jacketから2相配管のチムニー

- BESSYでジャケット付きTESLA空洞で実験されていて、チムニーが熱伝達を制限していることを実証。  
「CW operation of superconducting TESLA cavities」(SRF2007)
- $1.53\text{W}/\text{cm}^2@1.8\text{K}$ (TESLAの場合は $23\text{cm}^2$ 。長いとさらに損する)
- LCLS-IIでは”95mm chimney”と言っているなので、断面積 $71\text{cm}^2$ 。

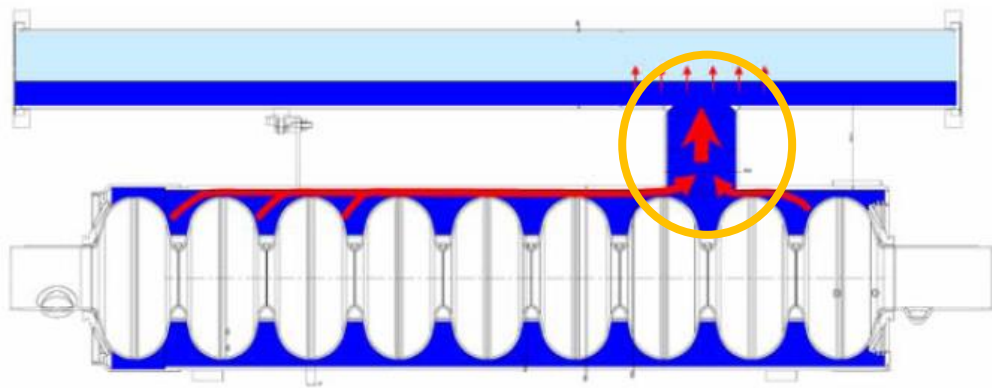


Figure 2: Layout of the helium vessel.



LCLS-II He jacket & chimney

# まとめ

- EUVに向けたクライオモジュールの検討を行っている。
- 第0次案を検討。検討課題をピックアップした段階。
- 大方針としては、STFクライオモジュールをベースとして、CW用に改造を加えたクライオモジュール、および付随する構成コンポーネントを用いる。
- 空洞・HOM damper/couplerは、新規設計・製作。
- Input couplerは多少設計変更。
- Tunerはほぼそのまま採用。
- 断熱真空槽および各種配管はSTFのものをベースとするが、2K回収配管・2相配管へのチムニー・5Kシールドの簡略化などの改良を加える。
- また、磁気シールド、アライメント、ゲートバルブなどについて見直す。
- 詳細な熱設計、磁気シールド設計、HOM設計などは今後詰めていく。



# 質問事項

1. アラインメントの要求精度は？
2. 電磁石・モニターはモジュール内に設置しなくて良いか？
3. 電磁石・モニターはどのように配置するか？
  - 1ユニット(8空洞)おきで良いか？
  - 低エネルギー一部では、より多く設置する必要があるか？
4. RF amplitude/phase安定性への要求は？
5. その他(お気づきの点があれば、コメントをよろしくお願いたします。)