

EUV光源に向けた クライオモジュール設計の方針

2015年11月4日

ERL検討会

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)

2015 Source Workshop(Nov. 9-11@Dublin)にて「Current Progress on Design Work of High Power EUV-FEL based on ERL」とのタイトルで発表予定



EUV LITHO, INC.

Promoting EUV Lithography via Workshops, Consulting & Education

- Home
- Upcoming Events
- EUVL Workshops
- Source Workshops
- Lithography Education Series
- Short Course Registration
- Workshop Registration
- Sponsorship Information
- EUVL Technical Reports
- About us



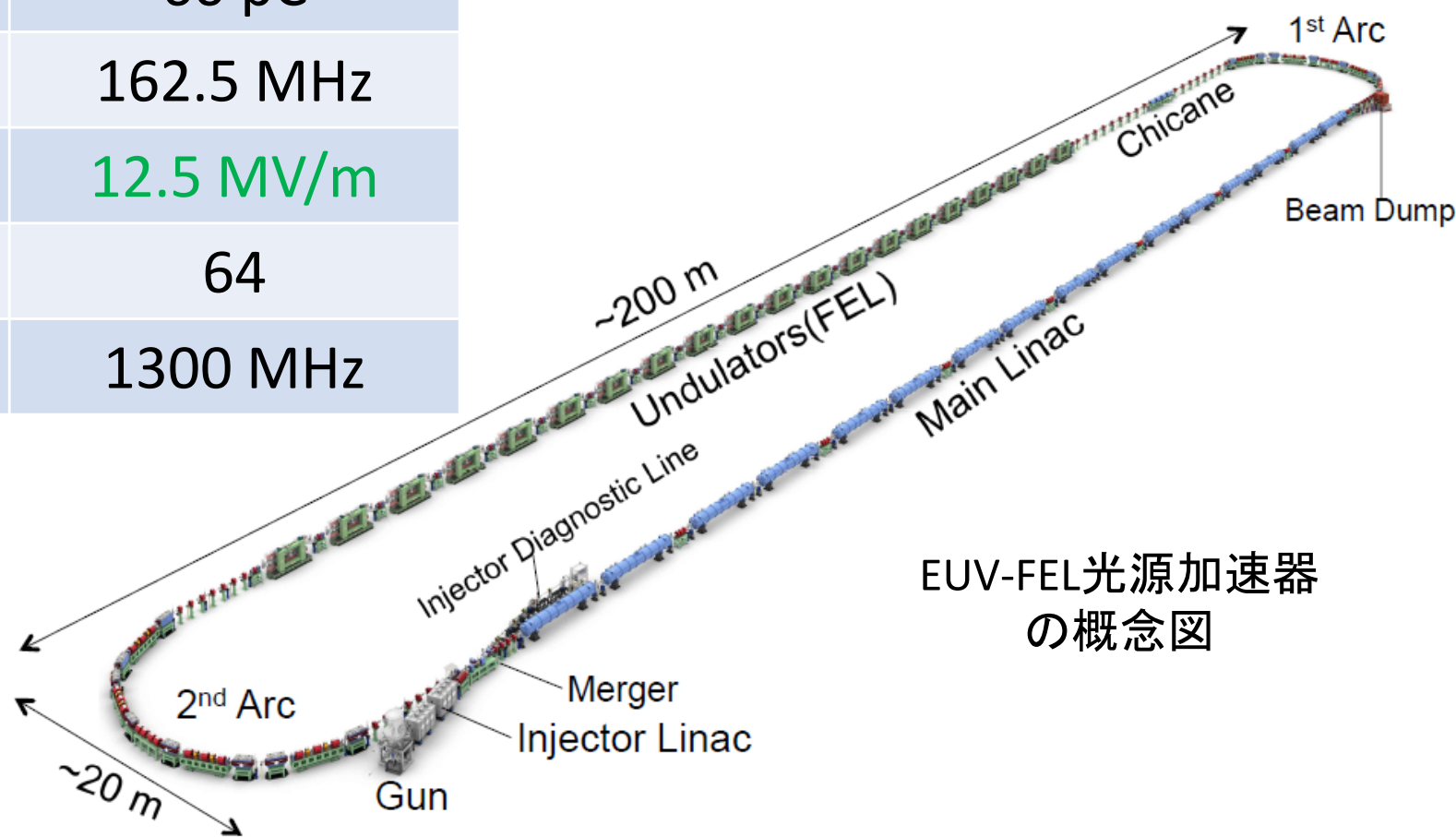
Final Agenda Announced

On-line Registration Deadline (without late fee)- October 26, 2015

We are happy to announce the final agenda for the 2015 Source Workshop. The abstracts and agenda for the workshop can be downloaded at the links below. We are also happy to announce the keynote speakers for the workshop. On-line workshop registration, sponsorship and lodging information is now available on our website at links below. The deadline for submission of abstracts was September 15, 2015. We are still accepting abstracts for post-deadline poster papers until October 23, 2015. The last day for registration, without late fee is October 26, 2015. All authors have been informed of acceptance of their papers. We now have

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 ~ 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 ~ 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 ~ 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

• アライメントの精度

- 1mm程度のアライメント精度で良いのか？

Support structure
Alignment monitor etc

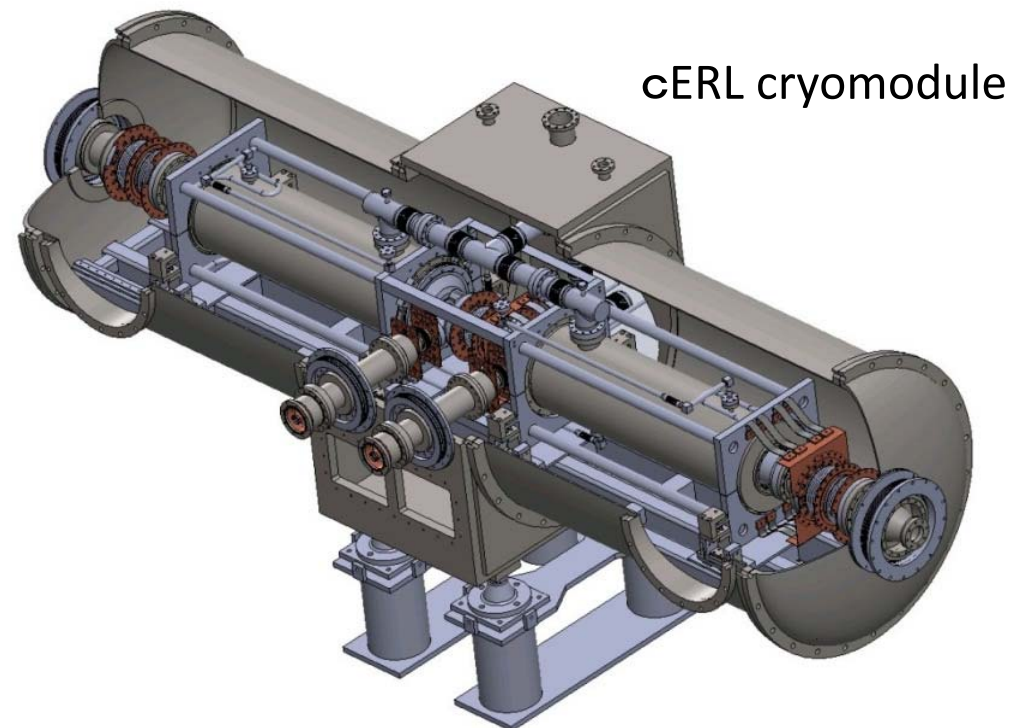
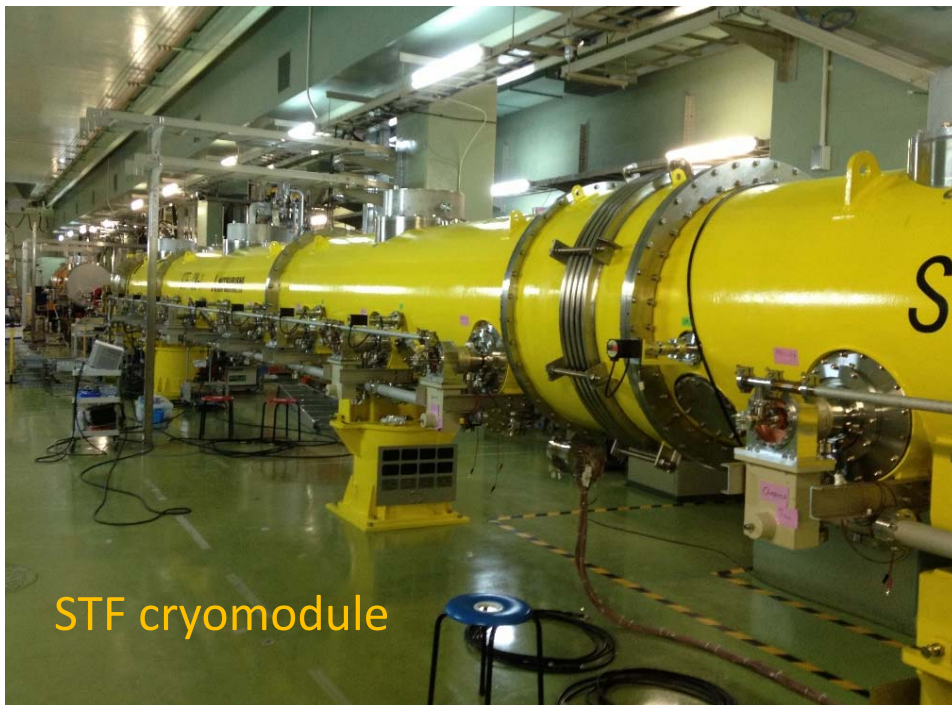
• 運転における安定性

- 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。

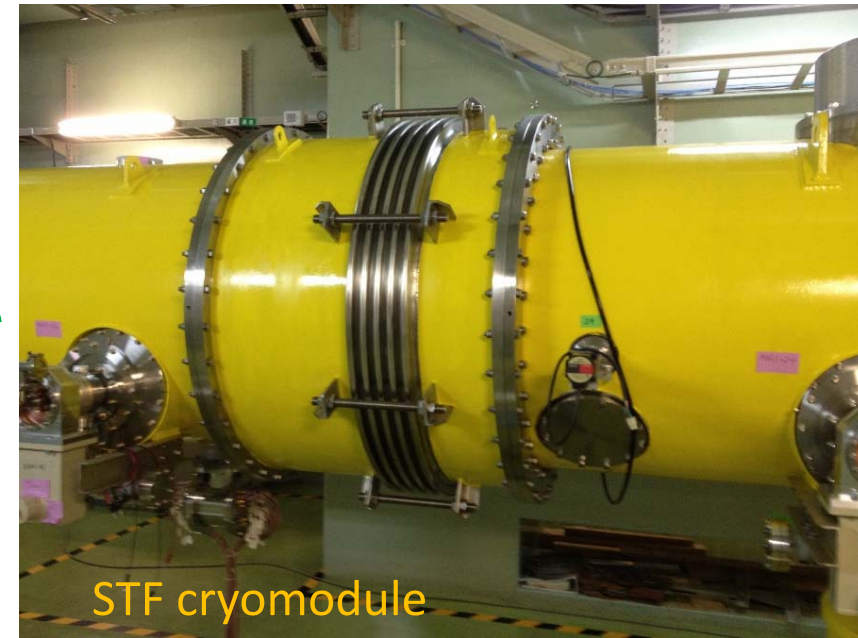


STFとcERLクライオモジュールの比較

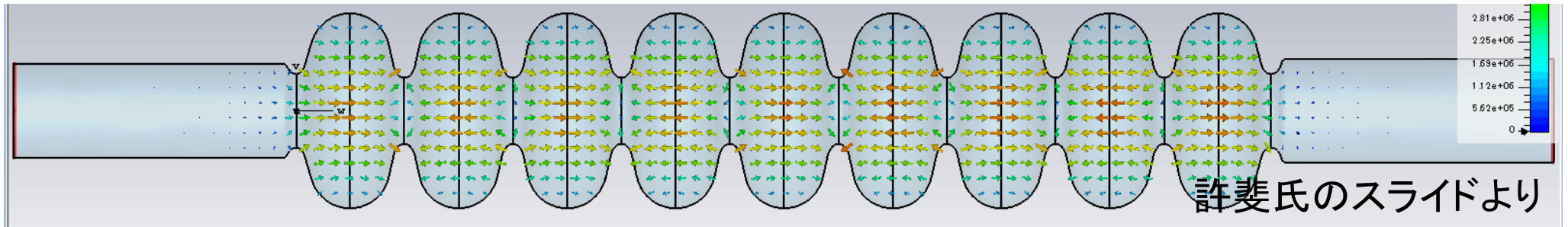
	STF cryomodule	cERL cryomodule	EUV cryomodule
Cavity	TESLA-like 9-cell	HOM damped 9-cell	TESLA type with large beam pipes
Input coupler	Co-axial, double windows, pulse type	Co-axial, double windows, CW type	cERL type with some modification
HOM damper	TESLA type HOM coupler	Ferrite HOM damper	AlN(?) HOM 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

クライオモジュール設計の方針(2)

- 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
 - ユニット両端でwarm-sectionと接続。
 - ユニット中央は、モジュール同士を接続。Warm-sectionは設けない。
 - 電磁石およびモニターはモジュール内に設置しないことを想定している ⇒ それで良いか？ 必要なら検討する。
 - 電磁石は8空洞おきで良いのか？
 - 低エネルギー一部は4空洞おきに電磁石を配置することも可。
 - 電磁石・モニターの配置を検討して欲しい。
- Cold box、冷凍機の配置ならびにクライオモジュールとの接続については今後の検討課題



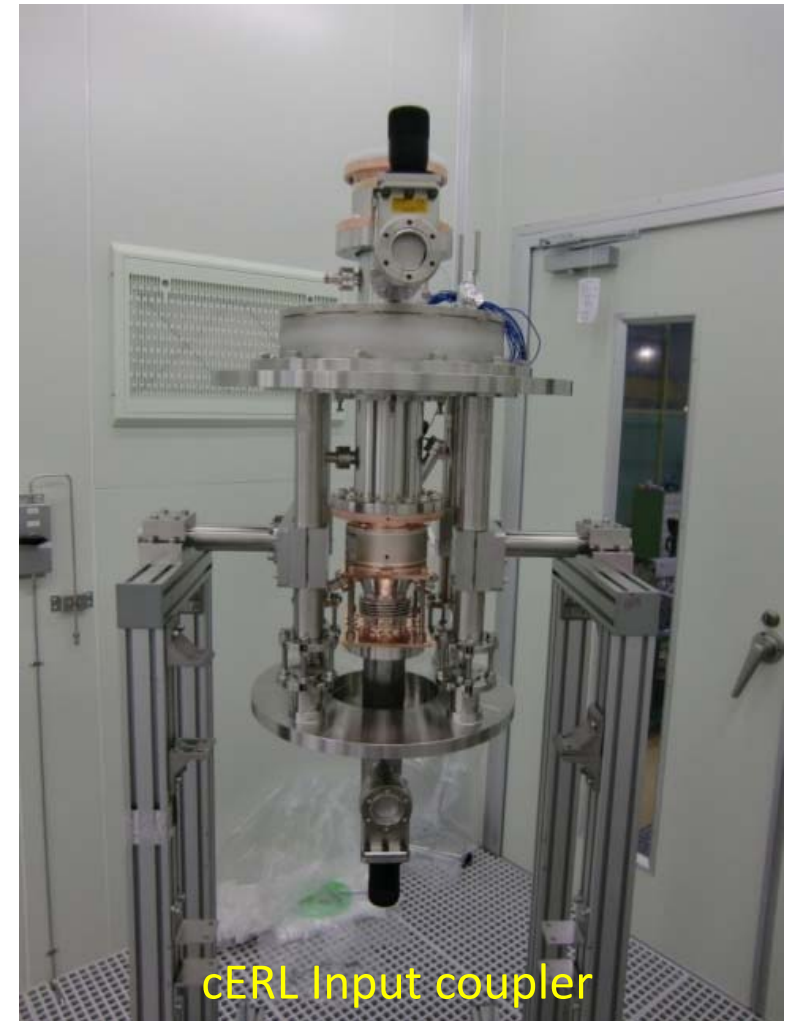
Cavity with He jacket



- 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

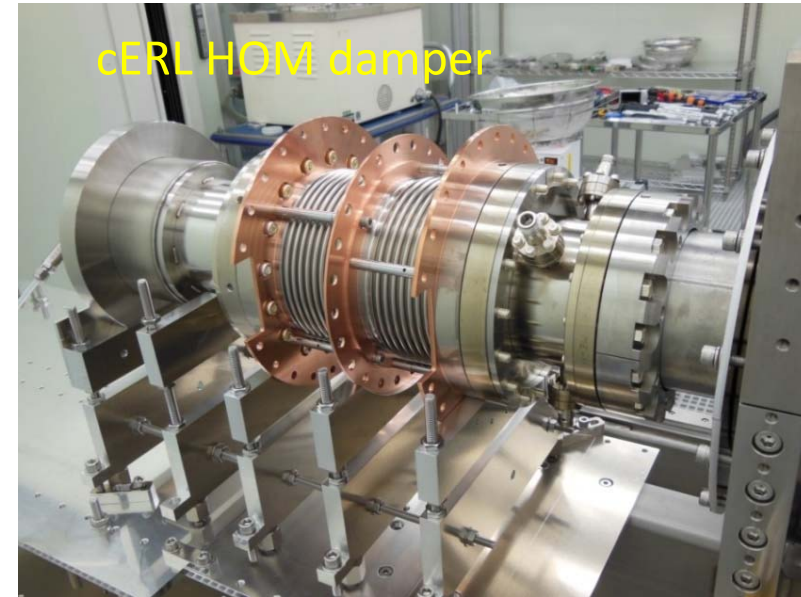
Input coupler

- 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 2×10^7 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。



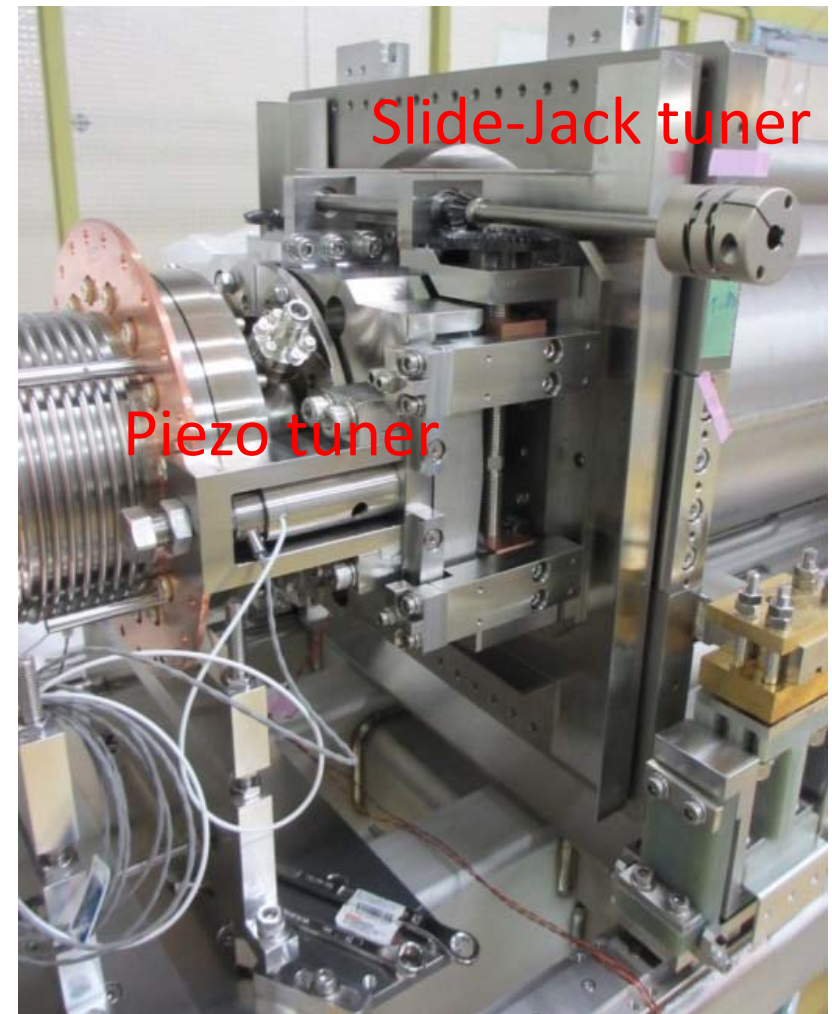
HOM damper/coupler

- 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。



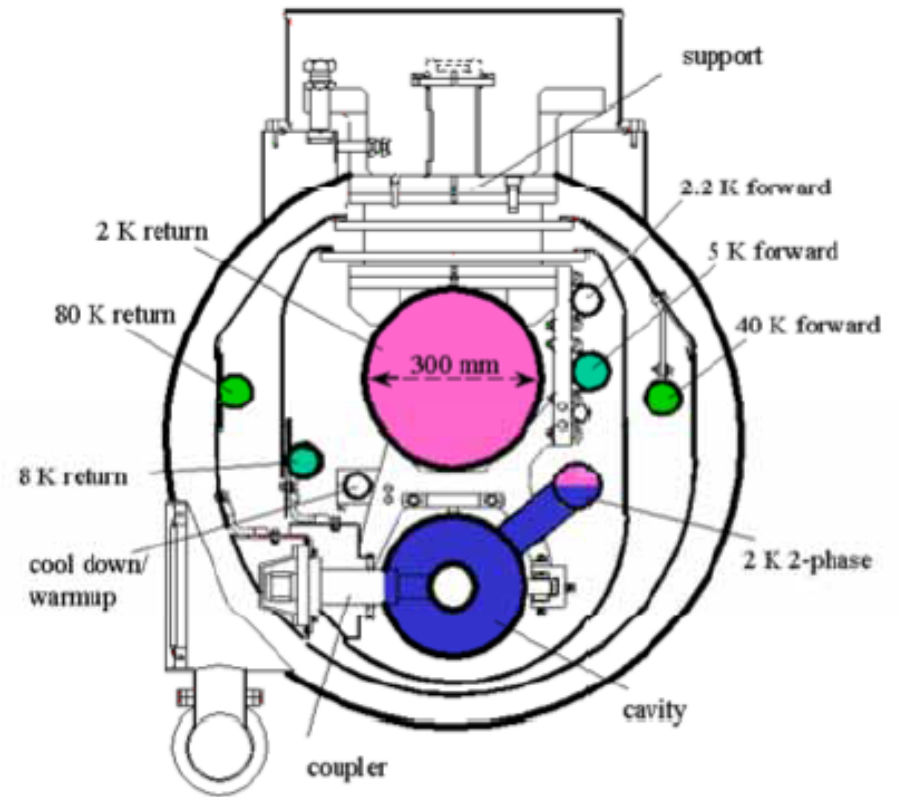
Frequency tuner

- 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(現在もそうになっている)



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がられている。
- 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

• アラインメント

- ワイヤモニター(STF型)? レーザー?(cERL型) トランジット?
- 冷却後、アライン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)
- 1.53W/cm²@1.8K(TESLAの場合は23cm²。長いとさらに損する)
- LCLS-IIでは”95mm chimney”と言っているので、断面積71cm²。

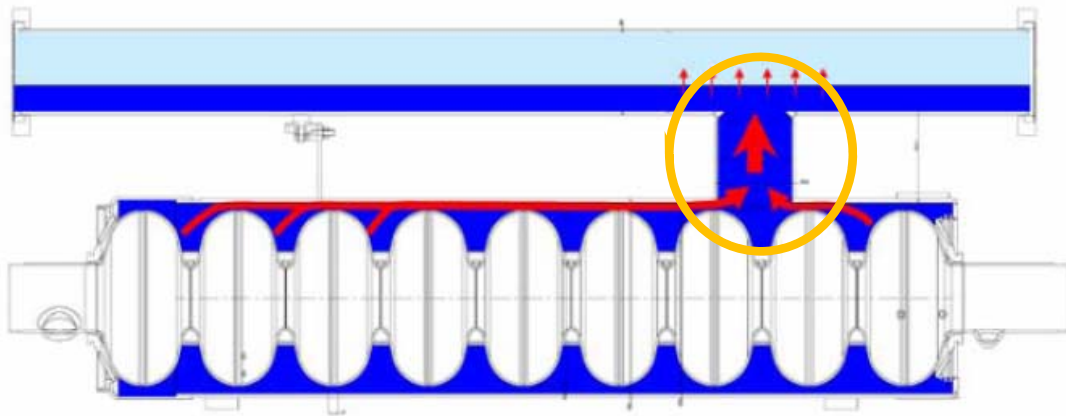
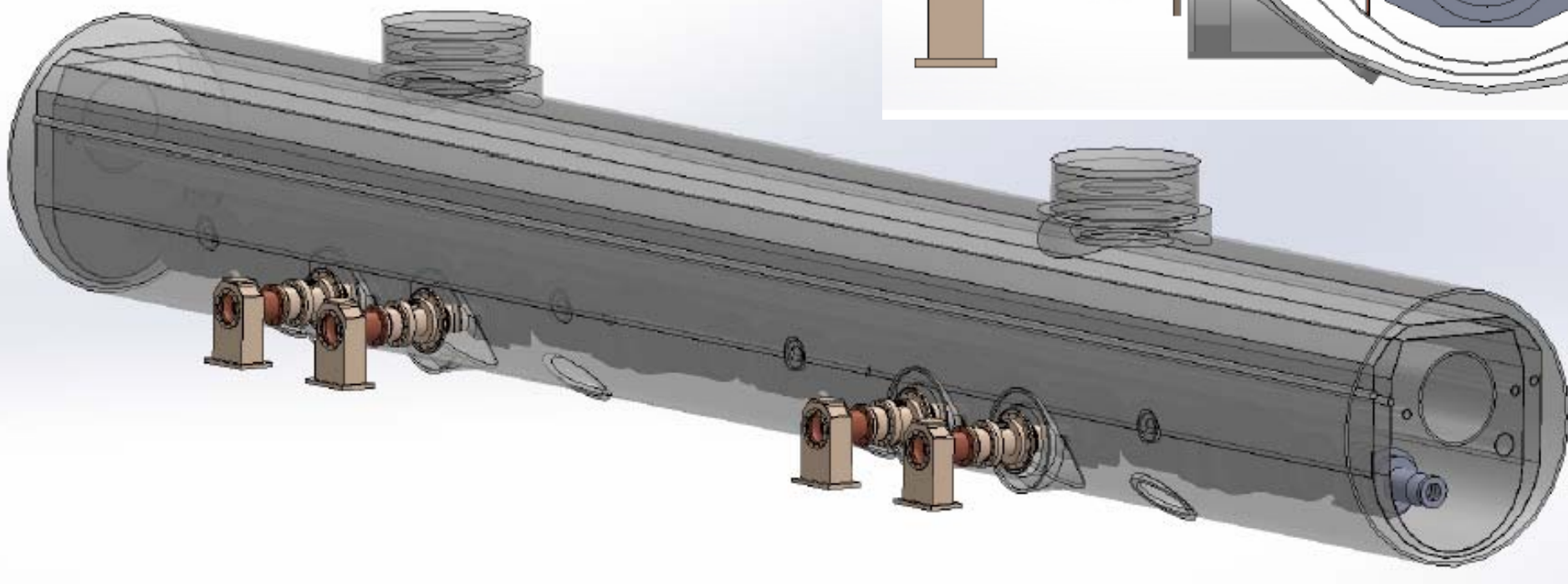
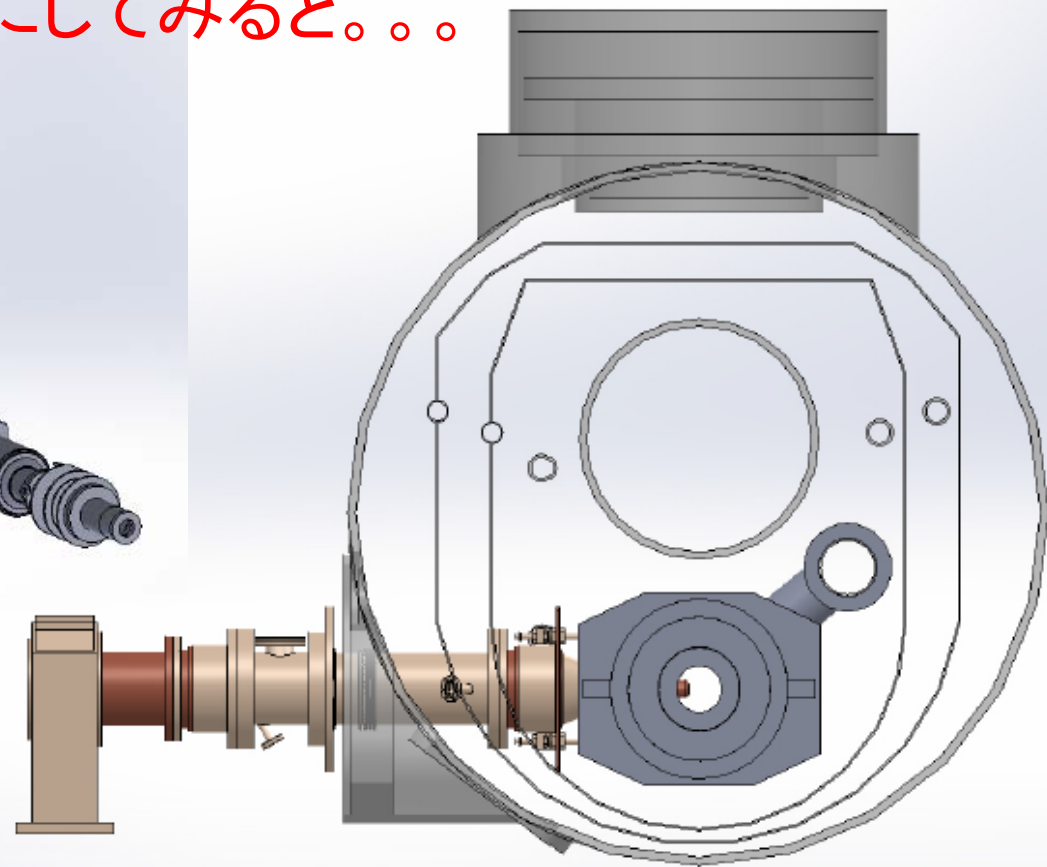


Figure 2: Layout of the helium vessel.



LCLS-II He jacket & chimney

以上の議論を概念図にしてみると。。。
(Thanks, 許斐君)



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。)