

電子銃の状況報告

- ・200kV電子銃立上げ状況
- ・500kV電子銃(2号機)開発の状況

高エネルギー加速器研究機構
山本将博



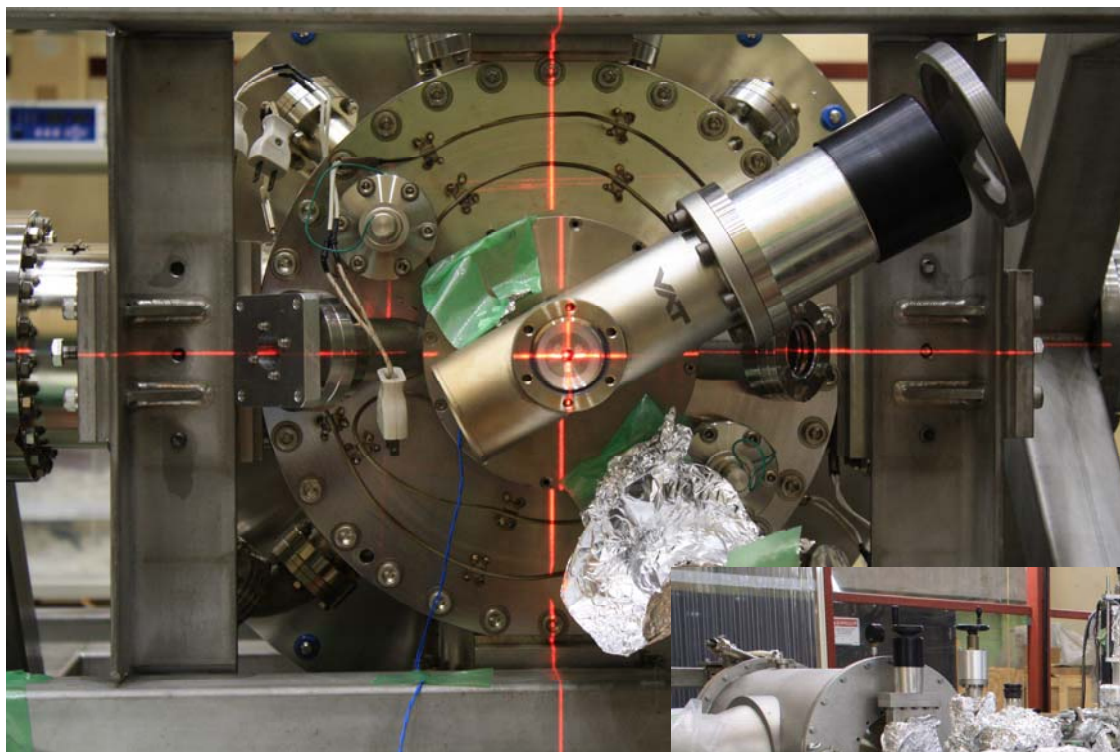
AR南実験室への
200kV電子銃(NPES-3)
の搬入

搬送後のリークチェックでは
リーク箇所は特に無し。

AR南実験室への
ピコ秒レーザーシステムの
搬入

800nm帯で出力~900mW
81.25MHzモードロック発振



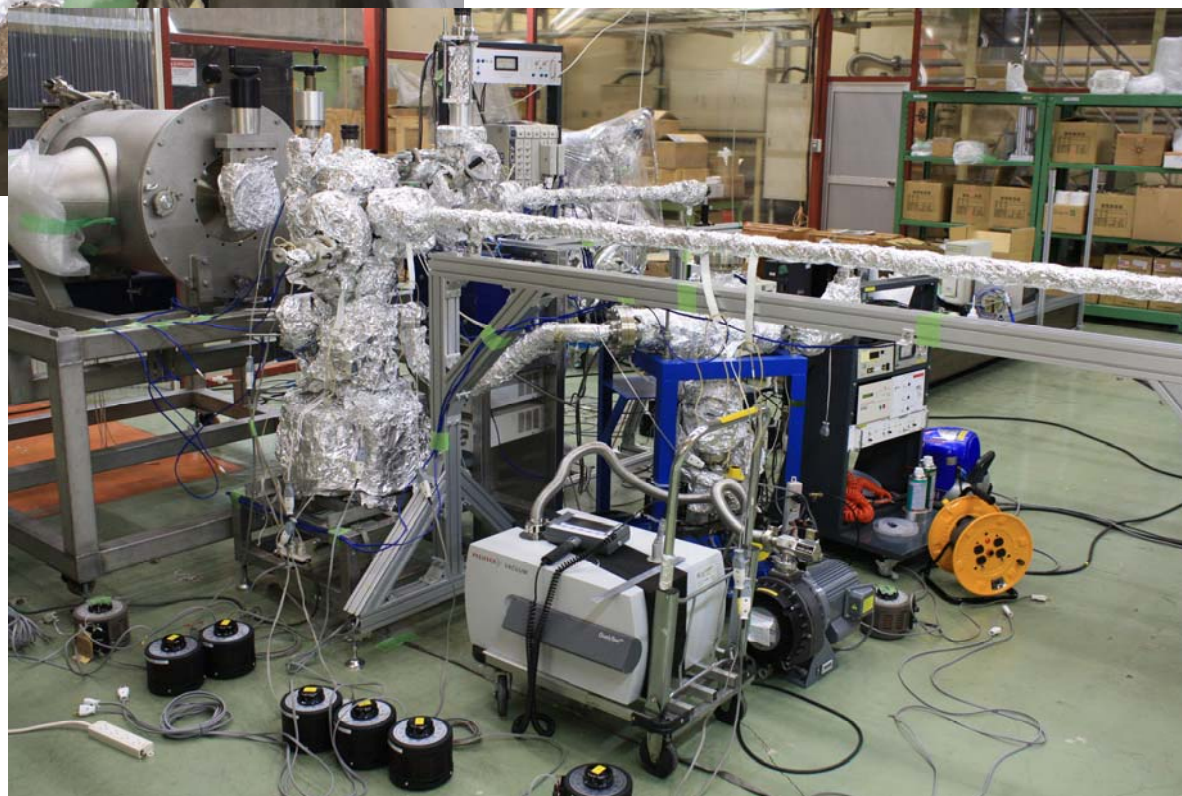


電子銃、活性化系Chamber
の位置出し。

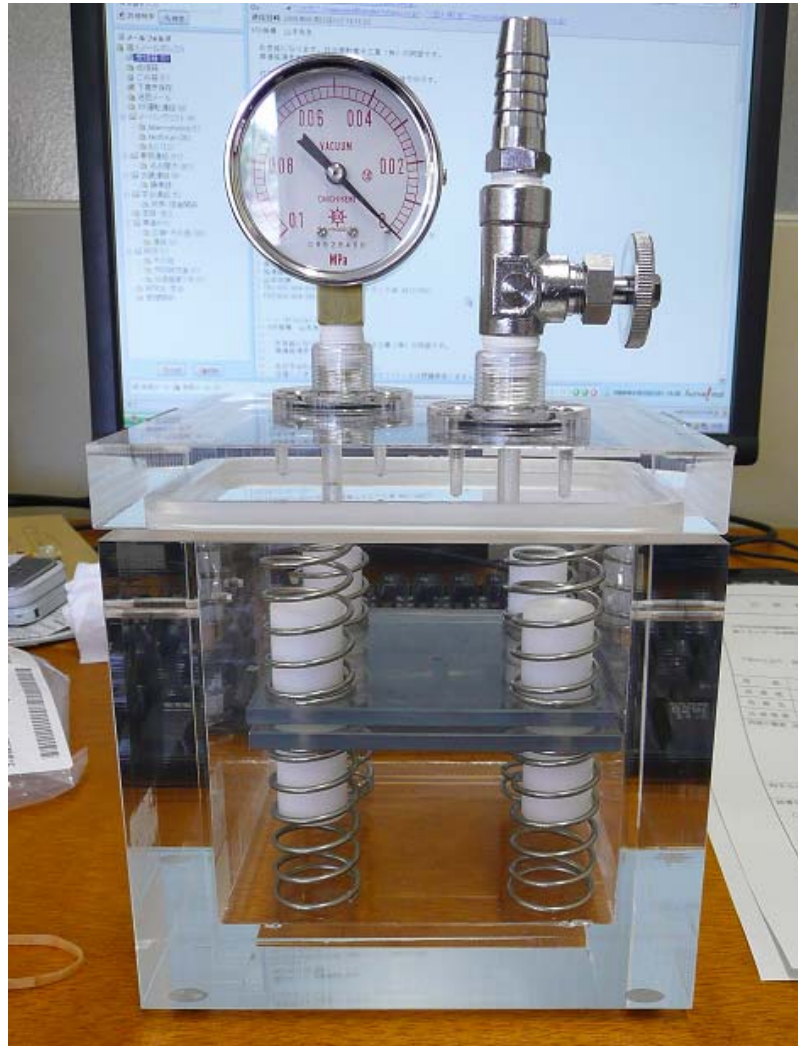
活性化システムの
ベーキング

排気系はPFグループより
借用

・到達真空度 $1 \times 10^{-8} \text{Pa}$
名古屋大で得られた真空が
再現できた。



フォトカソード搬送用デシケーター



丸型Bulk結晶は割れてしまう。
(結晶ケース内で暴れたらしい)

丸型($\phi 23\text{mm}$)の結晶については、
今後1インチサイズのウェハーケース
に入れて搬送。

活性化システムのテストは角型の
Bulk結晶を用いて今後進める予定。



電子銃から電子ビームを引出すまでの工程

- ・フォトカソード活性化試験
- ・電子銃ベーキング（約2週間）
- ・電子銃－活性化システム接続部ベーキング（1週間）
- ・電子銃高圧試験
- ・差動排気、ビーム移送系ベーキング（1週間）

今年中は寿命試験を行いつつビームライン(ビーム光学系、評価系)の準備。

1月頃よりビームラインへ光学系、評価系を順次インストール。

KEKにおける500kV電子銃(2号機)開発の状況

- ・開発の方針
- ・進捗状況

200keV電子源の現状とERL電子源

	NPES-3	ERL-Gun
加速電圧	200 kV	> 500 kV
電子銃真空度	2×10^{-9} Pa	$< 10^{-10}$ Pa
平均電流	$\sim 50 \mu\text{A}$	> 10 mA (100 mA)
Charge lifetime	~ 20 Coulomb	> 1,000 Coulomb
カソード寿命	120 hour	> 1 day

ERL電子銃実用化のために200kV電子銃(NPES-3)に加えて必要な項目

1. 極高真空 (10^{-10} Pa以下) を実現するための超低ガス放出真空容器
2. 極高真空 (10^{-10} Pa以下) 環境下でも高い排気能力を持つ真空ポンプ
3. 高い量子効率・高パワーレーザー照射に耐えうる半導体フォトカソードの開発
4. 高電圧・高電界環境下において低暗電流 (< 10 nA) を実現する加速電極
5. 新しいロードロック方式の確立 (フォトカソード・リボルバー方式)

500kV電子銃(2号機)開発は以上5点を主軸に設計を進めている。

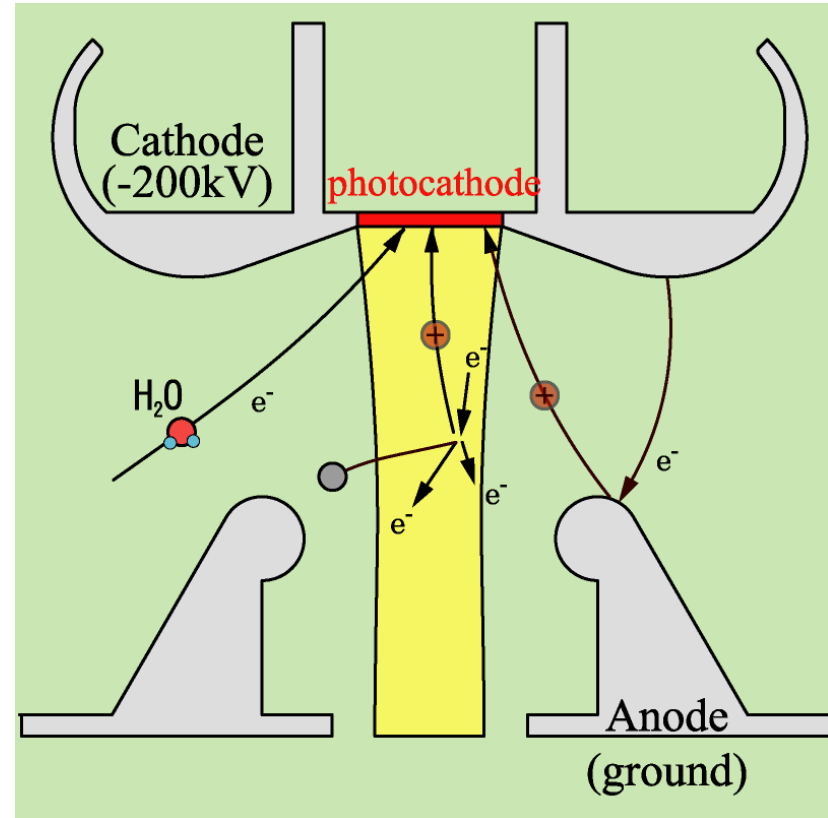
NEA表面の寿命問題

$$QE(t) = QE_0 \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{gas}}} + \frac{1}{\tau_{\text{DC}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ion}}}$$

NEA表面劣化の主な要因

1. 活性分子の吸着
2. 電界放出暗電流
3. イオン衝撃
- (4. 光吸収による加熱)



極高真空の生成と電界放出暗電流の削減が長寿命化の鍵

NEA表面寿命は装置(電子銃)の良し悪しで決まる。

NEA表面寿命

200keV-Gun(2008.Jun) 50 μ A, ~120時間 \Rightarrow ~20 Coulomb
ERL-Gun最低目標 10mA, 30時間 \Rightarrow ~1000 Coulomb

ERL-Gun最低目標の達成には、 10^{-10} Pa以下の極高真空の実現が必須。電子銃チャンバーに使用される各材料のガス放出量を極限まで削減が不可欠。

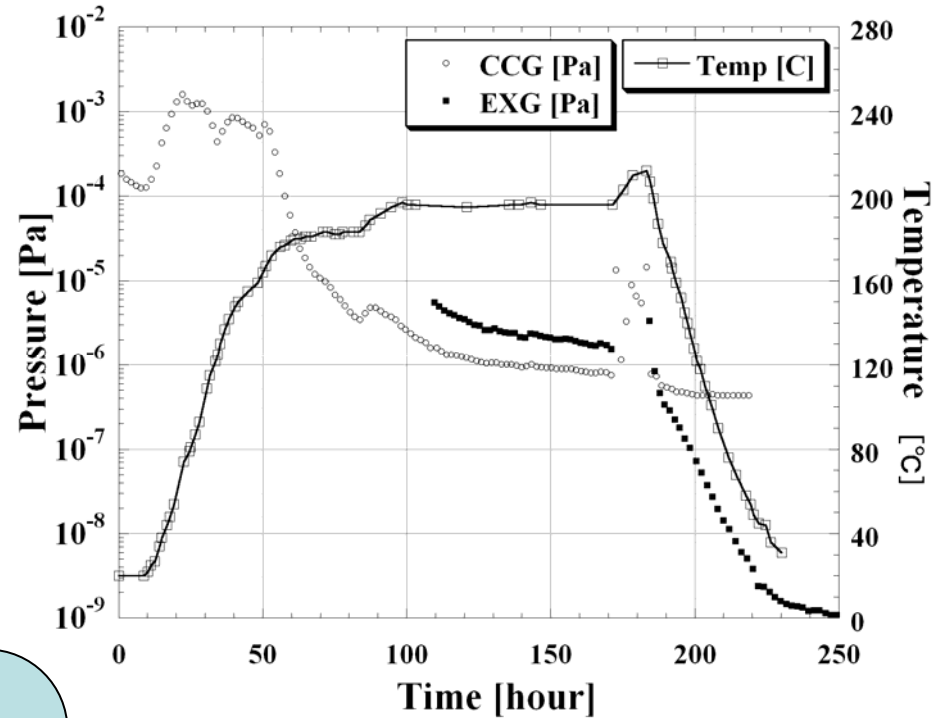
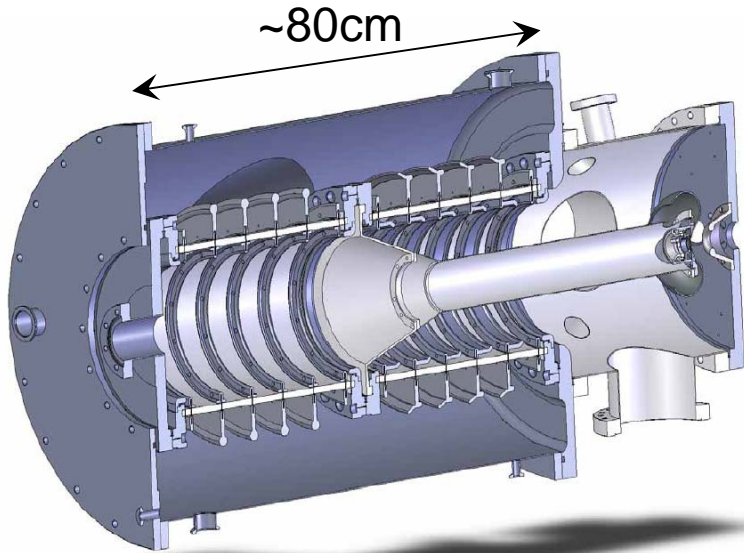
例えば、

Chamber内表面積 5m^2 、排気速度 10^4L/s の場合
 1×10^{-10} Pa以下の真空を得るためには

ガス放出速度を $2 \times 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m/s}$ 以下に抑える必要がある。

従来、真空容器に使用されるステンレス鋼(EP処理、ベーキング後)で得られるガス放出速度は $10^{-9} \sim 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m/s}$ 台。

200kV偏極電子源(NPES-3)の真空特性



名古屋200keV電子銃

排気系: 850 l/s NEG, 360 l/s IP
(NEGモジュール増強時~4700 l/s)

到達真空度: 2×10^{-9} Pa
(NEGモジュール増強時 5.6×10^{-10} Pa)

真空側表面積 $\sim 1.2 \text{ m}^2$ (うちセラミック部 $\sim 0.6 \text{ m}^2$)

Chamber素材はステンレス
(SUS304L、316L)でEP処理

ガス放出速度は
 $\sim 1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 前後

方針1

新材料を採用して 10^{-10} Pa以下を狙う。

ステンレス鋼に代わる低放出ガス材料

➤ 純チタンおよびチタン合金
10⁻¹²以下 Pa·m/s

H.Kurisu et. al., J.Vac.Sci.Technol. A21 L10-12
測定手段: 流路切替法

➤ BeCu
10⁻¹²以下 Pa·m/s

F.Watanabe. J.Vac.Soc.Jpn Vol.49, No6 349-356
測定手段: 蓄積法

- * 材料の毒性が問題
- * 溶接が困難

➤ AlCu(アルミ青銅)
BeCuより低放出ガス性能

F.Watanabe. J.Vac.Soc.Jpn Vol.49, No6 349-356
測定手段: 昇温脱離法による結果のBeCuとの比較

- * 特殊鍛造が必要

➤ TiNコーティング(SUS上)
10⁻¹³ Pa·m/s 以下

S.Ichimura et. al., Vacuum. 53 291-294
測定手段: 流路切替法

- * コーティングの一様性など

ERL電子源用半導体フォトカソード

新たに予想される問題

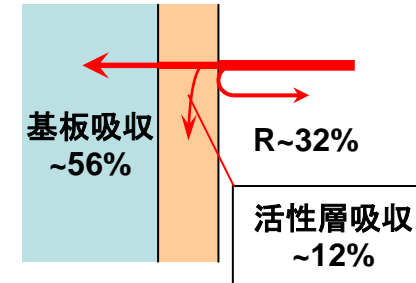
100mAビーム出力に必要なレーザー
パワーは、励起レーザー波長が、
800nmにて量子効率1%では約15W
532nmにて量子効率5%では約4.7W
" " 1%では約23.3W

結晶の光吸収長が $1\mu\text{m}$ 程度のため、
実質ビーム生成に寄与する吸収量は1割。
Bulk結晶を含む従来型のフォトカソード
の場合では、半分以上のパワーが基板
で熱になる。

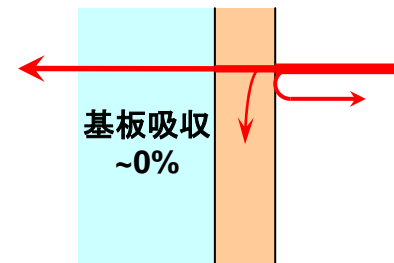
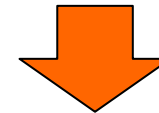
方針2. 透過型フォトカソードの利用

励起光を透過する基板を用い、基板での
レーザー光吸収を無くす。

名古屋大グループ(竹田研、中西研)の協力
の下、フォトカソードの評価は、立ち上げた200kV
電子銃・活性化システムで順次進めてゆく。

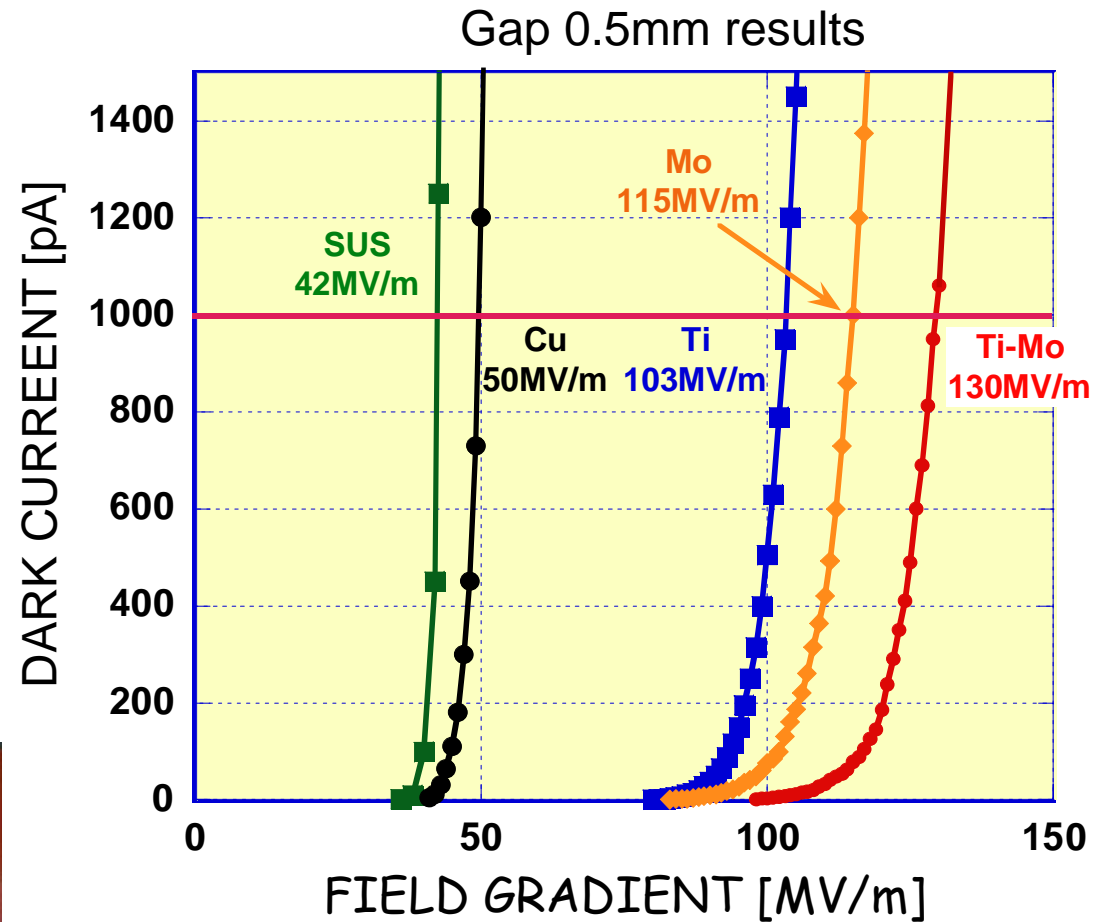
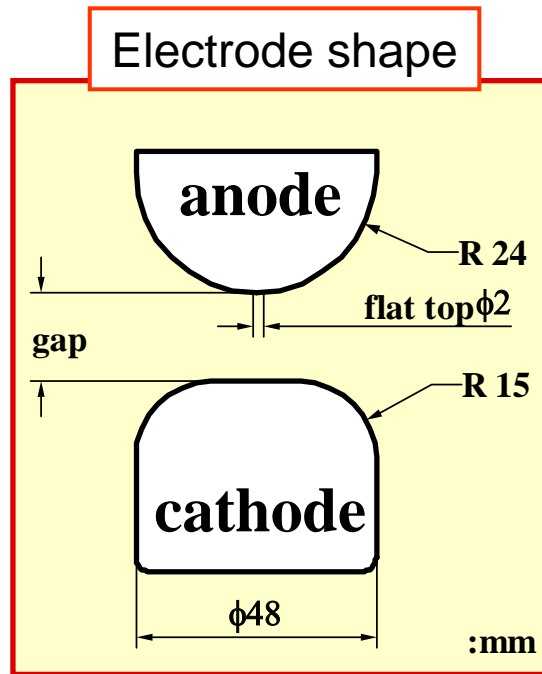


Active layer ~ 100 nm
吸収長 ~ $1\mu\text{m}$
基板吸収率 ~ 56%



レーザー光吸収による発熱の
影響は1/5程度に抑えられるはず。

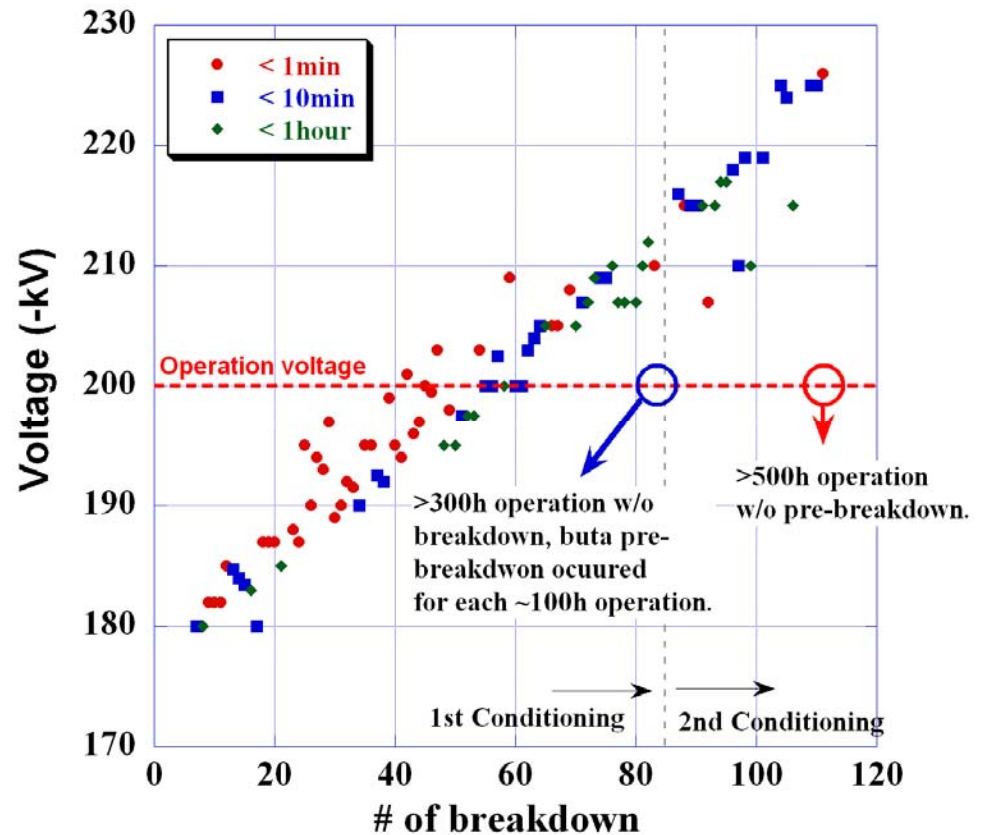
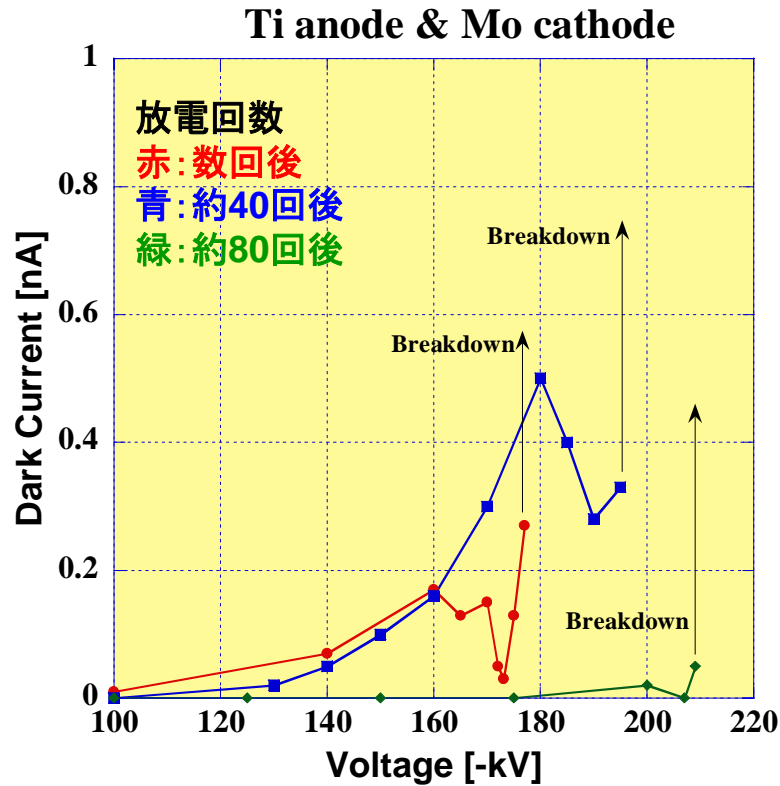
各種金属の電界放出特性



チタン陽極ーモリブデン陰極の組合せがBest。

F.Furuta et al., NIM-A 538 (2005) 33-44

電極の高電圧試験(チタン・モリブデン電極)



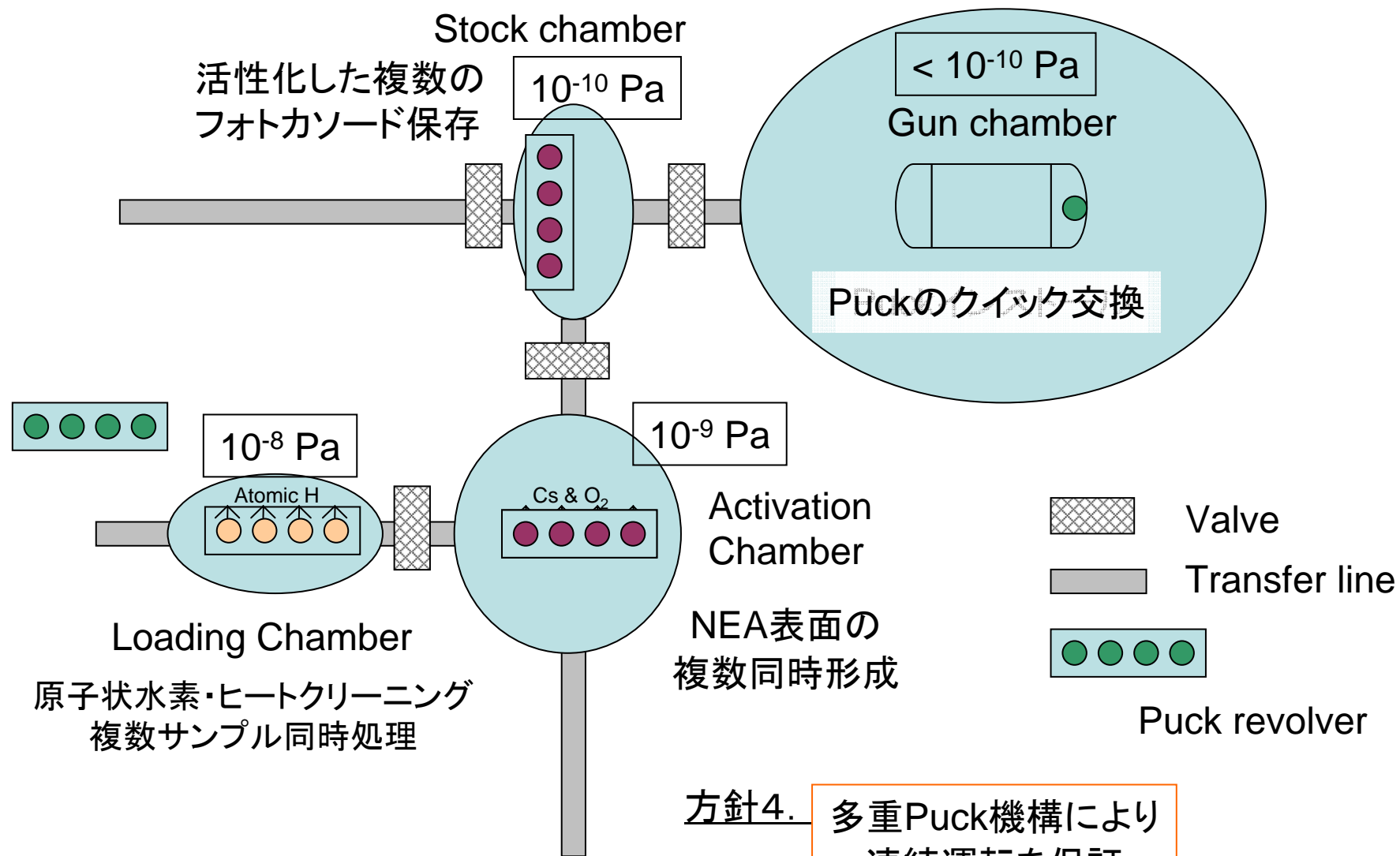
1度の放電につき約0.4kV放電電圧が上昇。

加速電圧200kVにて、

電極間暗電流 < 1nA、持続時間 > 900 hrs

方針3. 同じ手法で電極を作製し、かつ電界放出特性の研究をさらに進める。

ERL電子銃のためのロードロックシステム案



500kV電子銃2号機開発の進捗状況

1. 電子銃Chamber
2. 排気系
3. 高電圧セラミック管
4. 高圧電源
5. 電極

KEKにおける500kV電子銃(2号機)開発の状況

1. 電子銃Chamberについて

5月27日 第1案を元に詳細部の設計を開始

6月27日 極高真空の排気系の検討

7月7日 JAEA500kV電子銃1号機見学

7月9日 作製した第2案および仕様書案についての検討

再度修正し、仮図面にて見積り依頼(4社)

7月25日(予定) 第3案の確認

8月中(予定) 図面、仕様書の最終確認

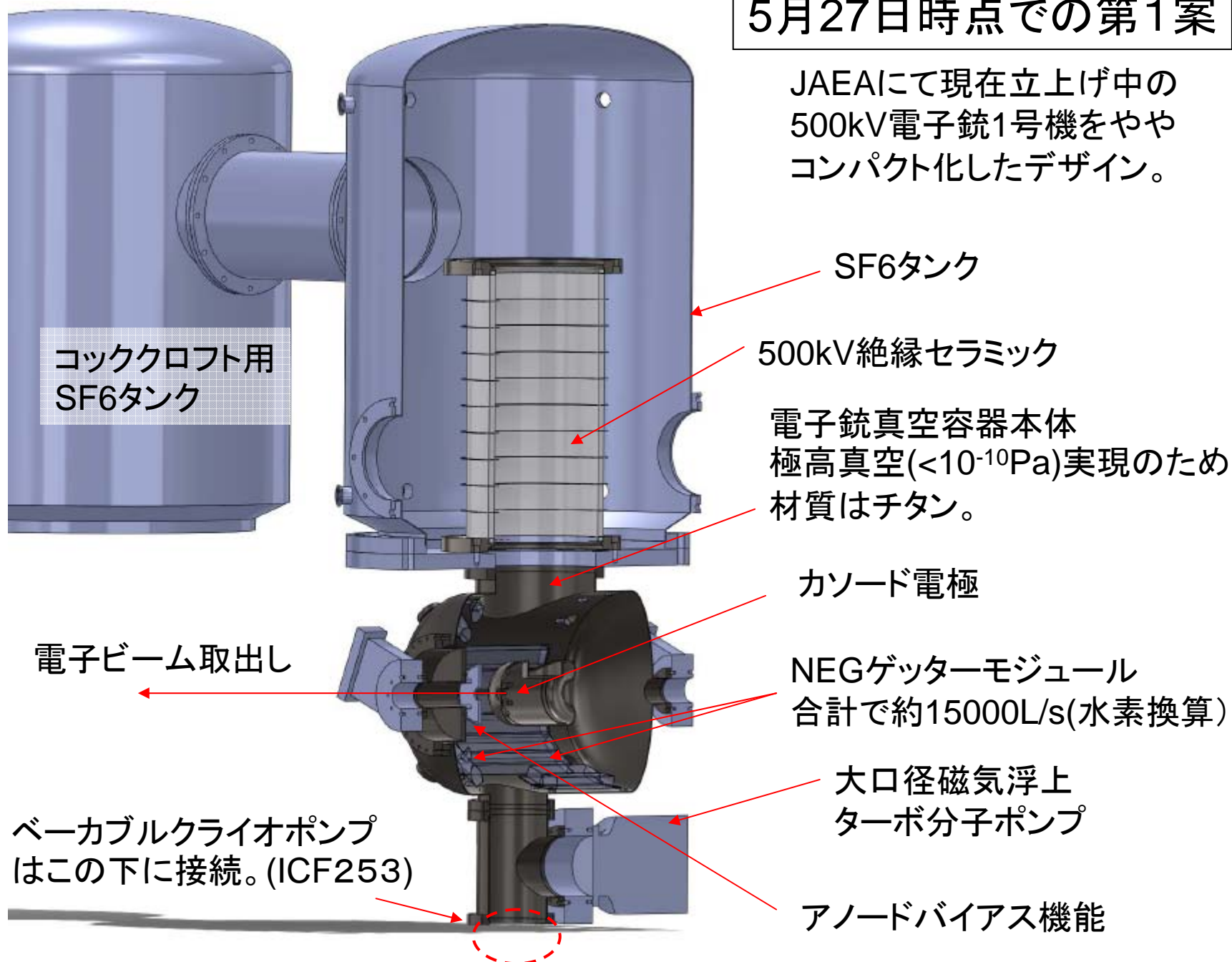
9月初旬(予定) 公示

10月初旬(予定) 発注

3月(予定) 納品

5月27日時点での第1案

JAEAにて現在立上げ中の
500kV電子銃1号機をやや
コンパクト化したデザイン。

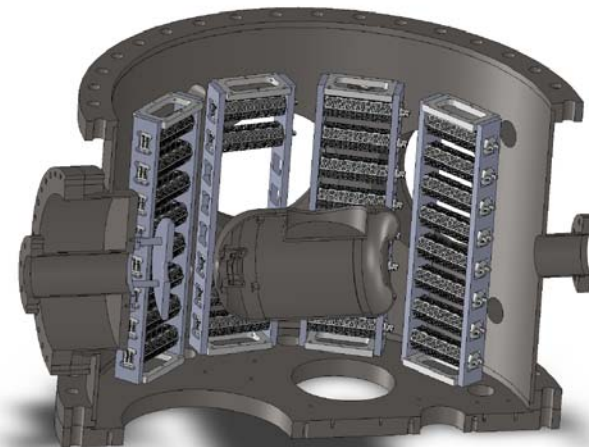
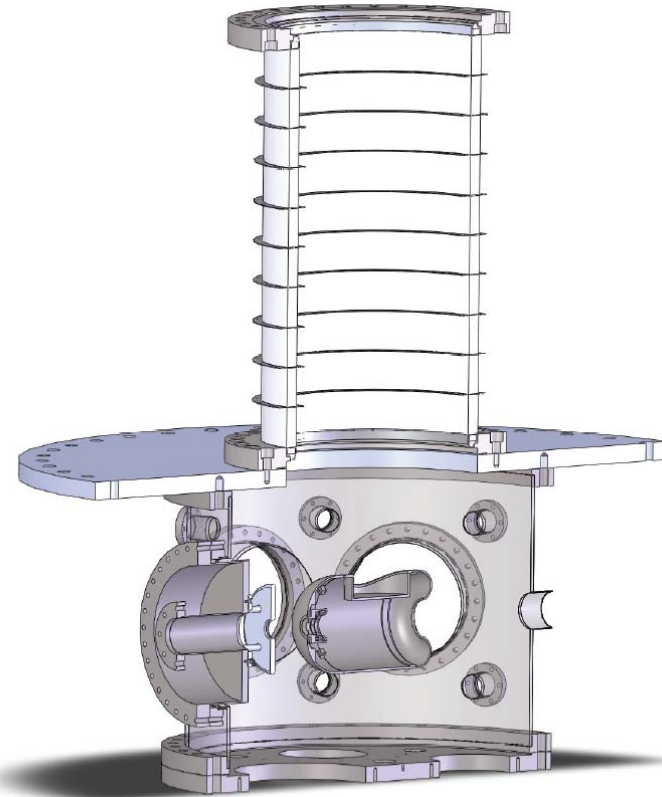


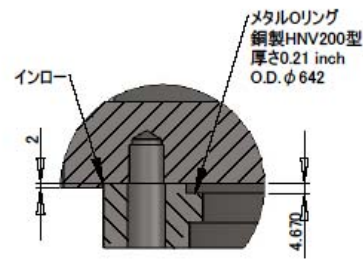
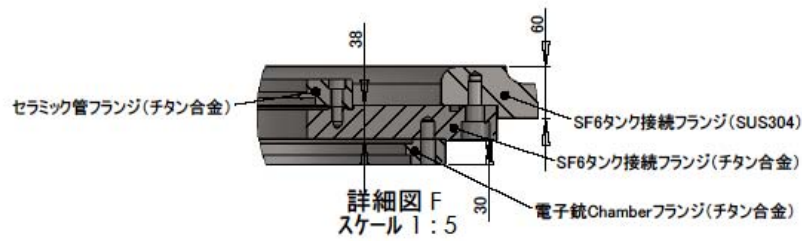
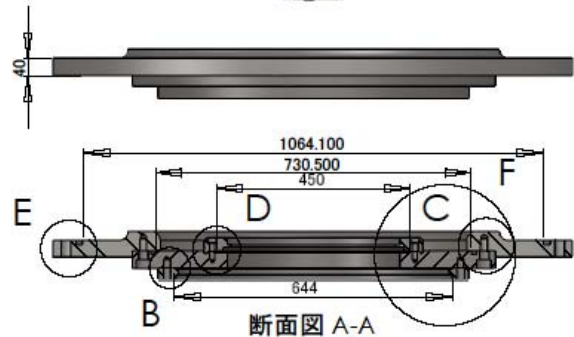
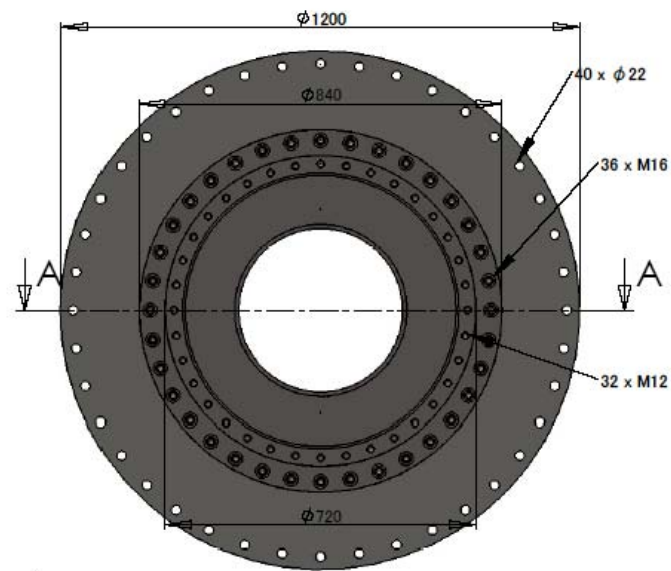
7月9日時点での第2案

- ・メンテナンス性の向上
大口径フランジ採用で、真空槽内部での作業性を向上。
- ・将来のアップグレード性
セラミック管の大型化にも僅かな装置の変更で対応が可能。
- ・カソード-アノード配置は第1案と同じ

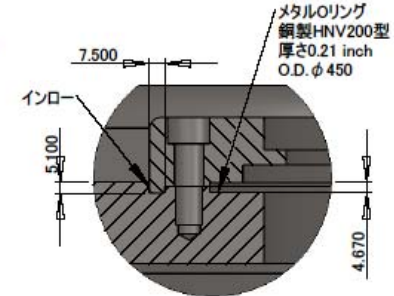
第2案の問題点

- ・大口径フランジ部の材料の確保およびその材料費。
- ・大口径フランジ部の真空シール。
(高価な特殊ガスケット)
- ・NEGポンプとカソード電極間のスペース
- ・NEGポンプ活性化時の熱の影響
- ・レーザー取出し構造がメインChamber内部に設置。

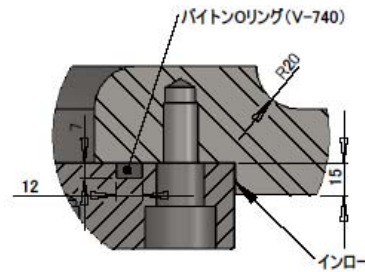




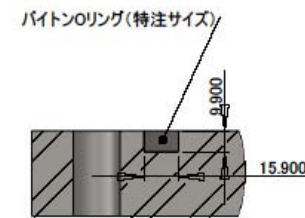
詳細図 B
スケール 1:2



詳細図 D
スケール 1:2



詳細図 C
スケール 1:2



詳細図 E
スケール 1:2

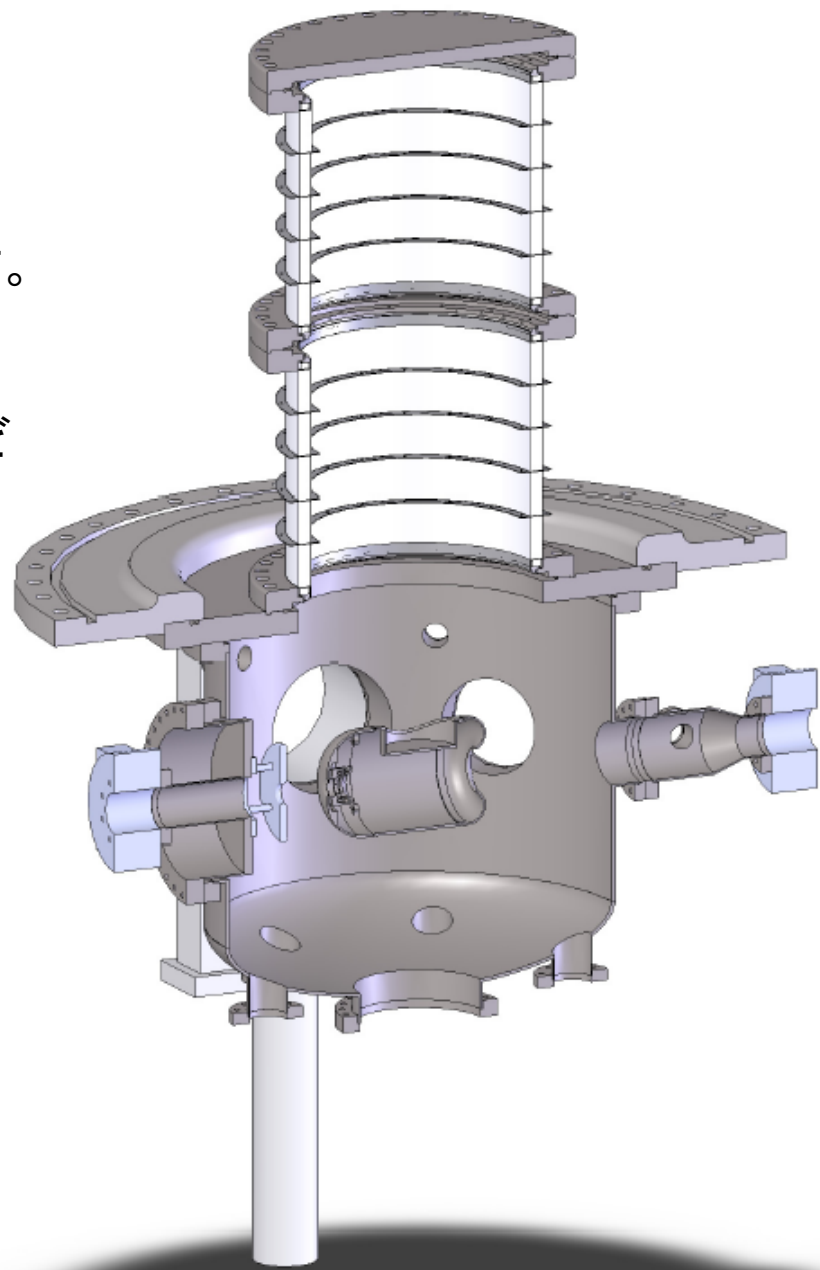
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN:	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:	
CHK'D:					
APP'VD:					
MFG:					
QA:				MATERIAL:	DWG. NO. flange_joint_asm A3

現時点(7/24)での第3案

第2案の問題点への対応

- ・大口径フランジ部を2箇所から1箇所へ減らす。
- ・SF6タンク接続フランジについては、一部をSUS製としてチタン部を減らす。
- ・NEGポンプは主に底部に配置し、TMP口などから直接見えないように配置する。
- ・Chamber後部にレーザー取出し用のサブChamberを挿入。(ICF152接続)

電子銃真空容器については現在、4社で見積り、納期確認中。



2. 排気系の検討

NEG内部水素濃度と平衡圧力の温度依存性

シーベルトツ則

$$\text{Log } P = A + 2 \text{ Log } q - \frac{B}{T}$$

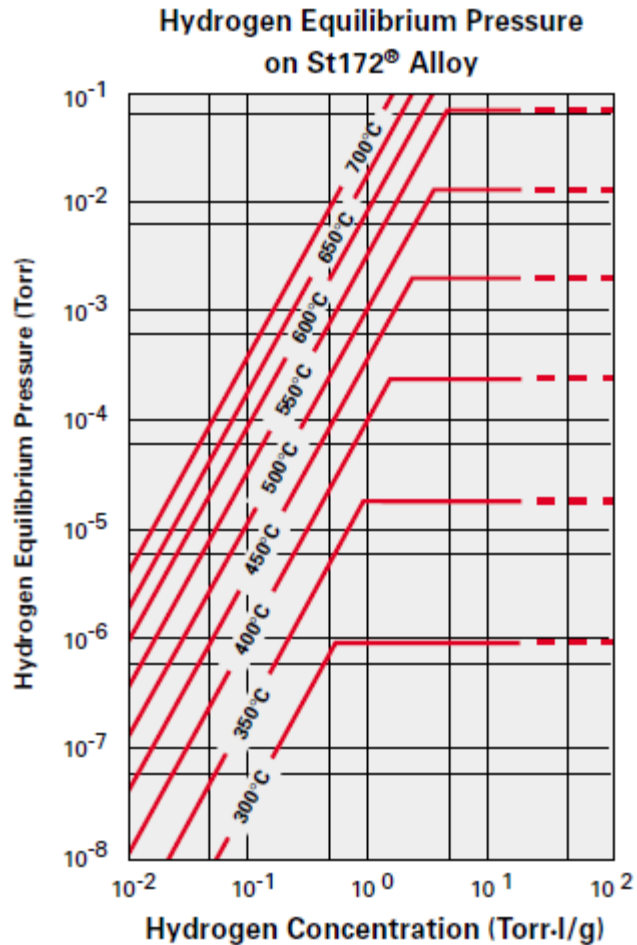
q = is the concentration, in liter•Torr/gram of alloy

P = is the equilibrium pressure, in Torr

T = is the getter temperature, in K

A : 4.8 (for St707), 4.45 (for St172)

B : 6116 (for St707), 5730 (for St172)



ゲッター温度	水素濃度	平衡圧力 (St172)	平衡圧力 (St707)
450 °C	5 Torr.L/g	8.4e-3 Torr	5.5e-3 Torr
450 °C	0.1 Torr.L/g	3.3e-6 Torr	2.2e-6 Torr
450 °C	0.05 Torr.L/g	8.4e-7 Torr	5.5e-7 Torr
200 °C	5 Torr.L/g	5.4e-7 Torr	1.9e-7 Torr
200 °C	0.1 Torr.L/g	2.2e-10 Torr	7.4e-11 Torr
27 °C	5 Torr.L/g	5.6e-14 Torr	6.5e-15 Torr
27 °C	0.1 Torr.L/g	2.4e-17 Torr	2.6e-18 Torr

NEG内部の水素を数十分の1程度に十分に潤らせば、式の上では平衡圧力は3桁程度改善。

NEG活性化時の排気時間の見積り

$$t = \frac{M}{F} \left(\frac{1}{q_f} - \frac{1}{q_i} \right) \times 10^{-\left(A - \frac{B}{T} \right)}$$

t:排気時間 (s)
 q_i:活性化前の水素濃度 (Torr・L/g)
 q_f:活性化後の水素濃度 (Torr・L/g)
 M:NEGの重量 (g)
 F:排気速度 (L/s)
 T:NEG温度 (K)

NEG(St707)では、A=4.8、B=6116。

初期水素濃度 5 Torr.L/g、ゲッター重量 1000g (排気速度 10m³/s 相当)の場合

活性化温度	活性化後の水素濃度	粗引き系の排気速度	所要時間(h) St172	所要時間(h) St707
450 °C	0.1 Torr.L/g	800 L/s	10.2	15.5
450 °C	0.05 Torr.L/g	800 L/s	20.5	31.4
450 °C	0.05 Torr.L/g	2500 L/s	6.6	10.0
400 °C	0.1 Torr.L/g	800 L/s	39.4	66.0
400 °C	0.05 Torr.L/g	800 L/s	79.7	133.3
400 °C	0.05 Torr.L/g	2500 L/s	25.5	42.7

粗引き系排気速度 2500L/s は、粗引き部に TMP に加え NEG(D2000)の使用時を仮定。

800L/sの大型TMP(引き口ICF253、磁気浮上型)での排気では、NEG内部の水素を溜らすには最低でも10~20時間程度の活性化時間が必要か。

極高真空仕様のクライオポンプ

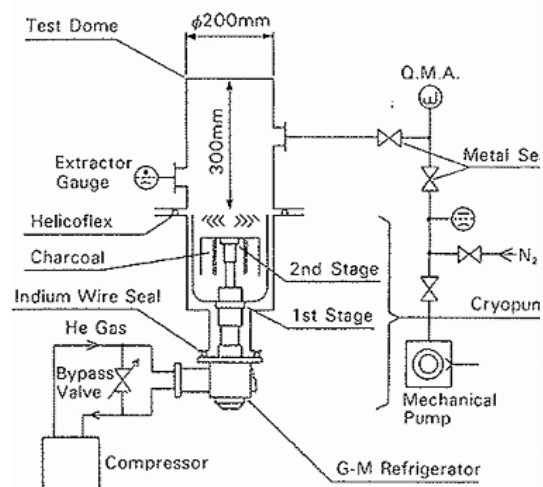


Fig. 1 Experimental Apparatus

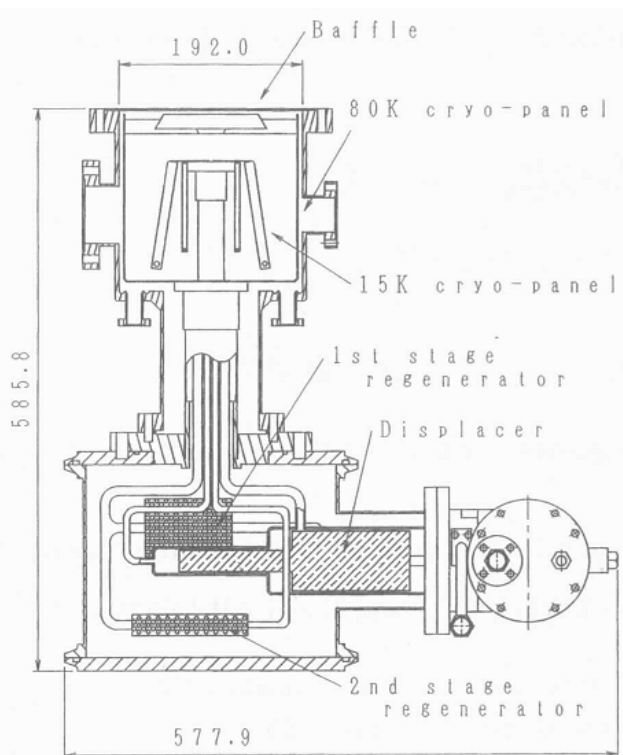


Fig. 1 Schematics of the new bakeable-type cryopump with regenerator-separated GM cooling system.

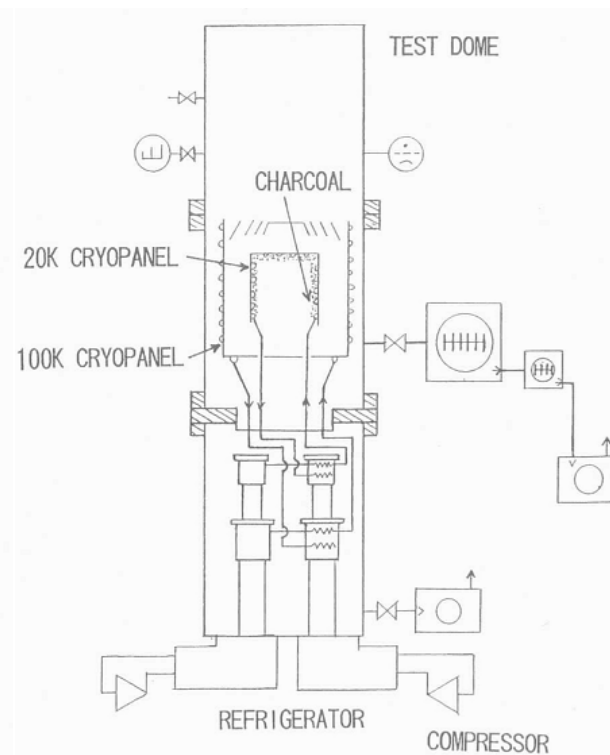


Fig. 1 Schematics of the new bakeable-type Cryopump and test dome system.

ベーキングがあまりできない冷凍機部分とメインChamberがコンダクタンスが小さな状態で接続される構造。

国内メーカー2社と協議中

3. セラミック管

セラミック材の候補

- ・微粒子-高純度アルミナセラミック
- ・耐沿面放電セラミック(2種類の遷移金属を添加し、表面の不對電子を処理した新しいセラミック)

- ・500kV電子銃1号機セラミック管との互換性をもたせる。
(トラブル発生時に臨機対応できるようにするため。)

- ・熱膨張差によるベーク時のリーク問題の回避
- ・銅製ガスケット(メタルOリング)シール

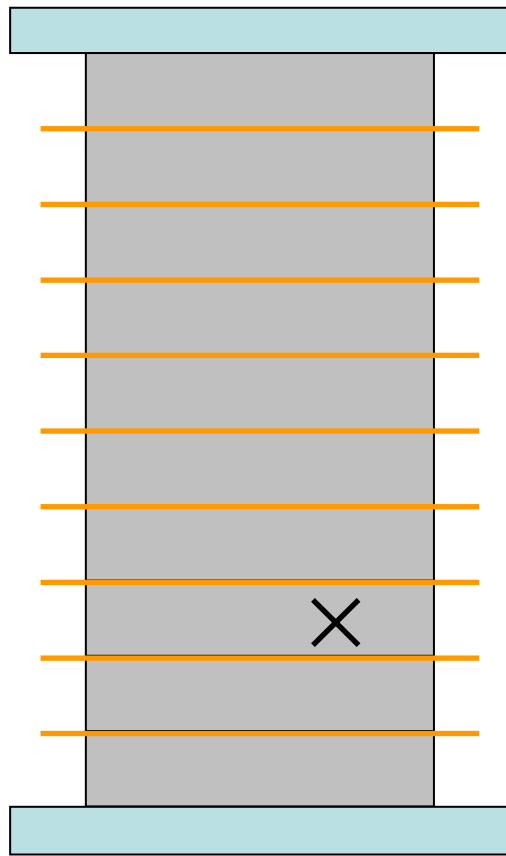
これらを満たすため、セラミック管フランジはチタン合金とする。

チタンとセラミックのロウ付けはあまり一般的ではない。
J-PARCセラミックダクトのフランジはチタン製であり、担当された
齋藤芳男氏よりチタン-セラミック接合に関して助言を受ける。

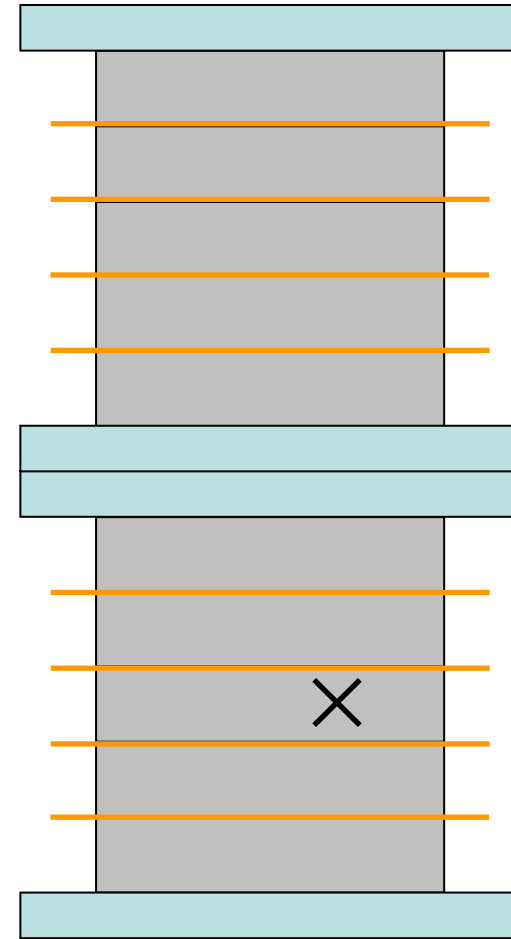
大型セラミック管作製およびチタン-セラミックのロウ付けの実績のある
国内メーカー2社と協議。まずは候補のセラミックについて真空特性試験
を進める。

■ フランジ(チタン) ■ セラミックス

— 分割リング(チタン)



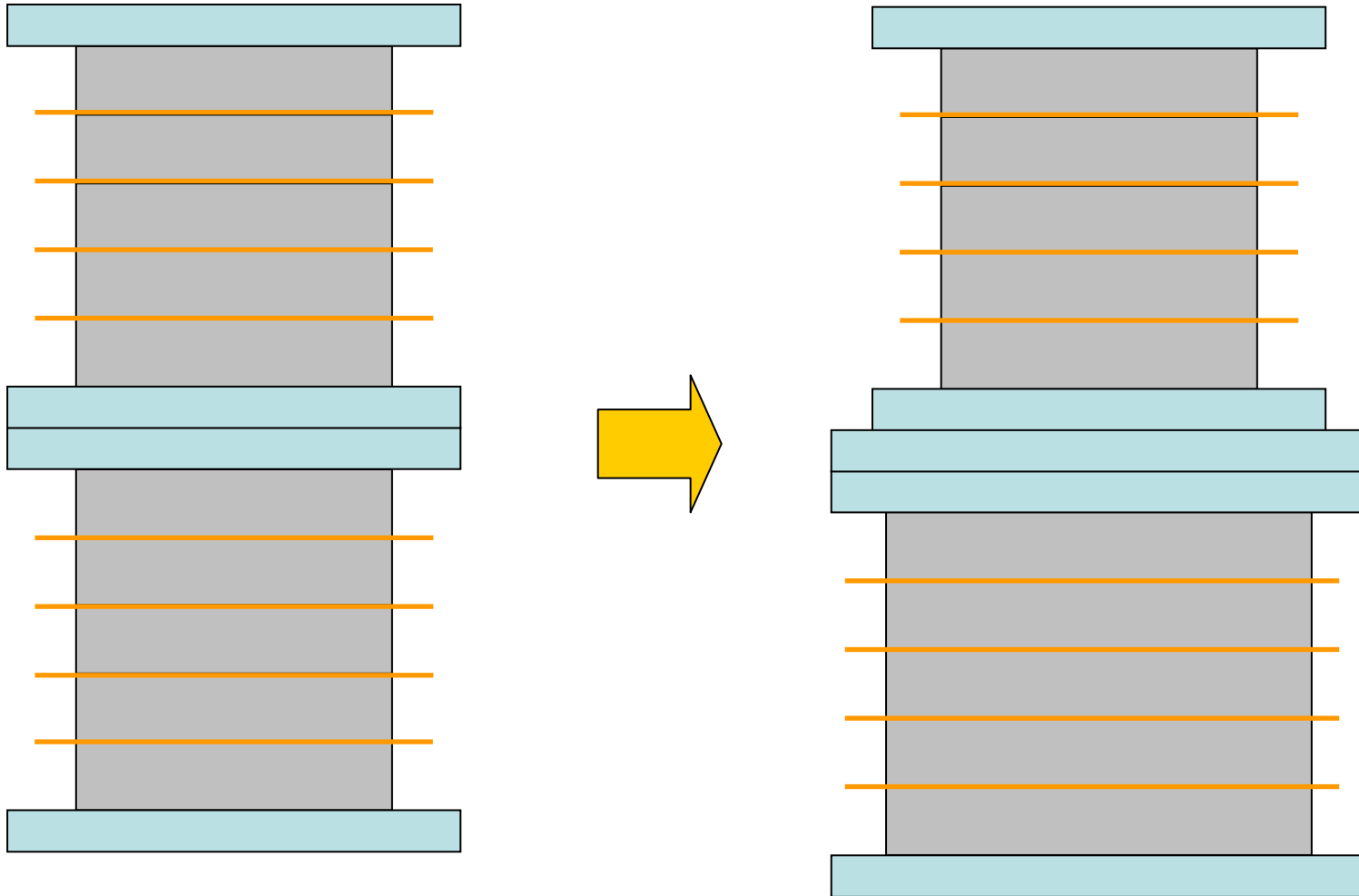
1組10段分割構成



1組5段分割で2組構成

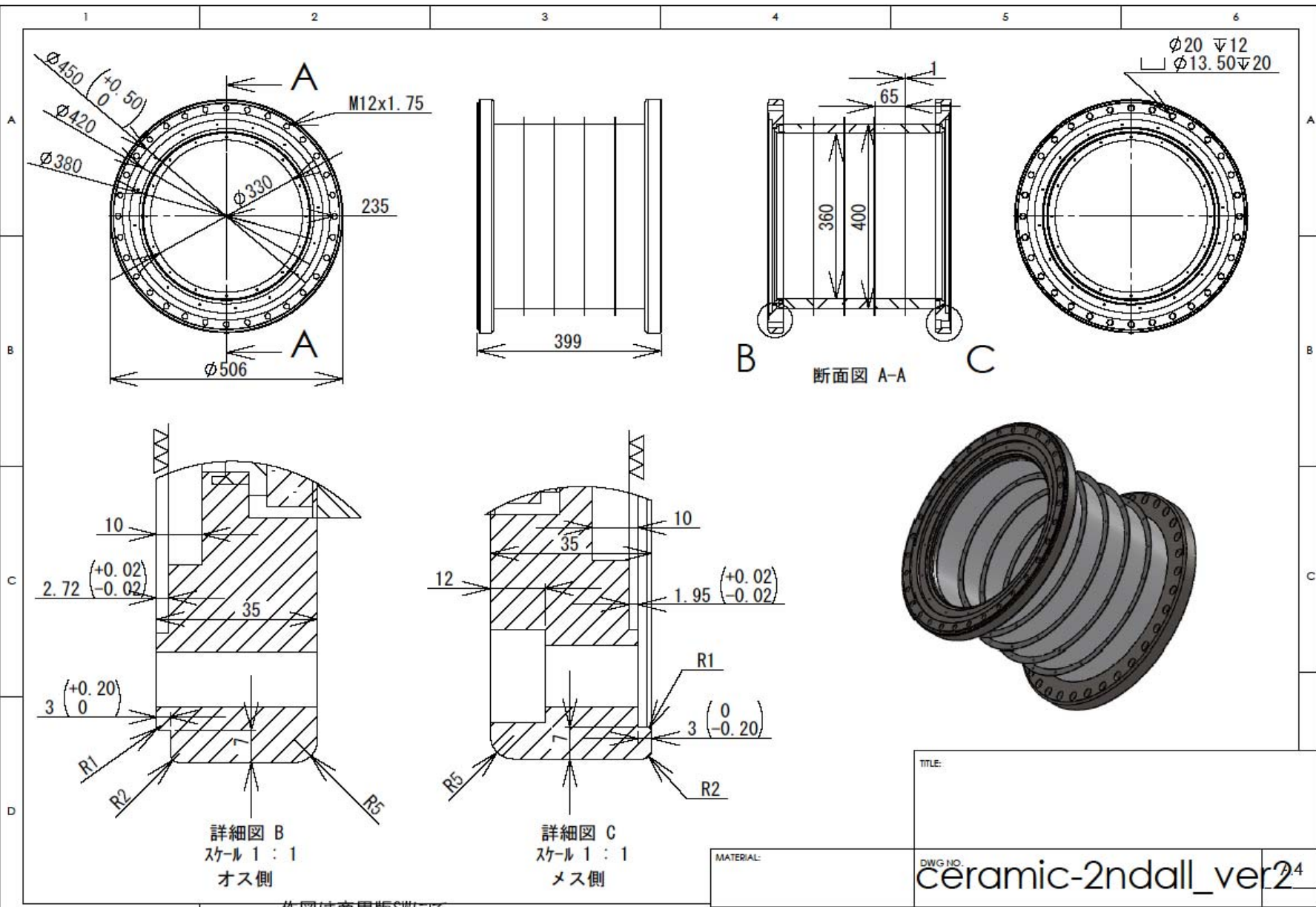
セラミック部でリークが発生した場合、1組10段分割構成の場合全部取替え(修理)となるが、作製時は多少割高でも2組構成にすると、故障した組だけの交換で済む。

セラミック部のトラブルの対処案(2)



もし、セラミックの径が十分でない
という状況がわかれば。

特に高電界となる下部のセラミック管の
径を大きくしたもので対応。



TITLE:

DWG NO. ceramic-2ndall_ver2.4

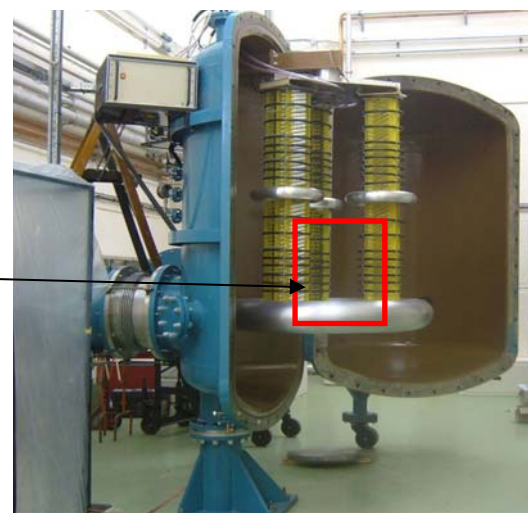
MATERIAL:

4. 高圧電源

- ・コッククロフト回路
- ・CTT(Cross Transformer Technology)方式高圧回路

コッククロフト回路方式による電源は最大5000kV、100kW級出力の実績のあるメーカーが国内に少なくとも1社あり。

Kaiser
-750kV, 100mA



Glassman
-500kV, 10mA

ERL09 Bruce Dunham氏スライドより

CTT方式の高圧電源はサイズが小さく、高電圧・高出力が可能。
コーネル大電子銃の高圧電源で実績。

国内の代理店は無かったが、これを機に国内電源メーカー1社が
Kaiser社と代理店・保守契約を7月中旬に交わす。

PESP2008 ワークショップでのU.Uhmeyer氏発表スライドより。ここでの紹介は一部のみ
(<http://conferences.jlab.org/PESP2008/program.html>よりダウンロードできます。)

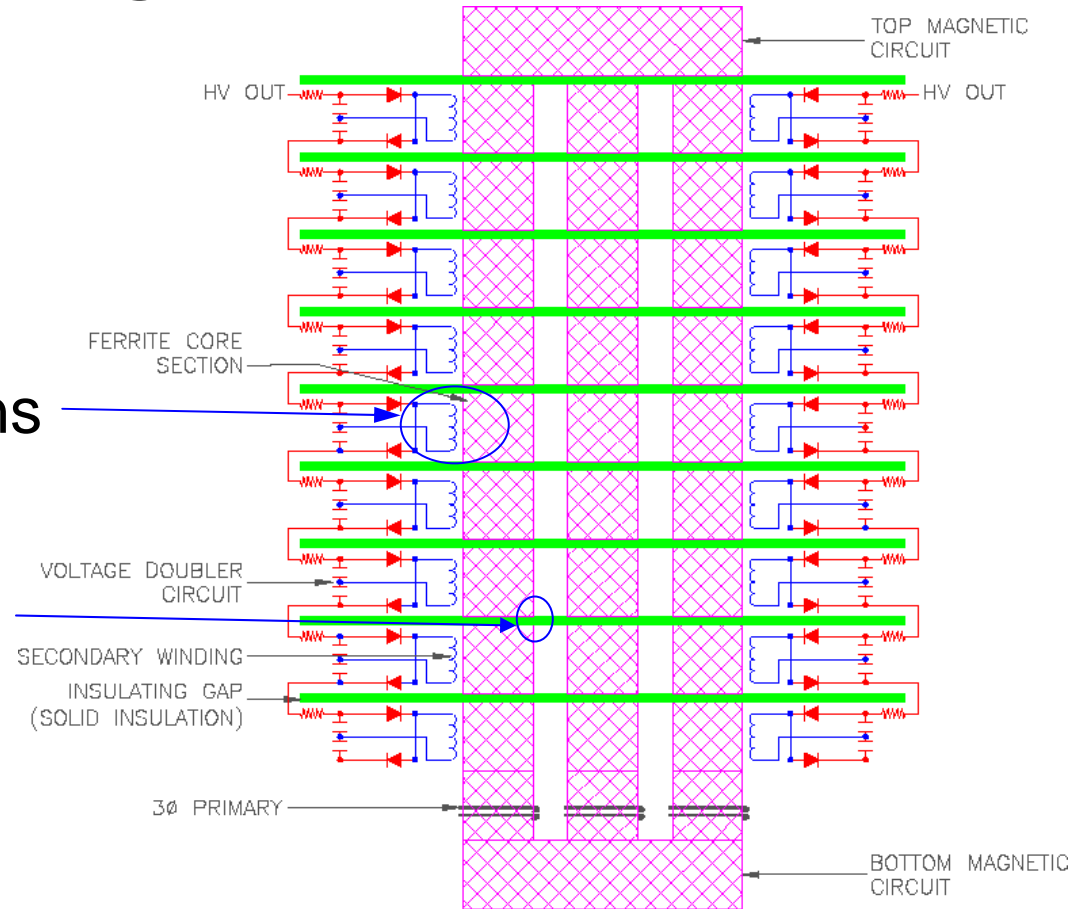
Cross Transformer Technology (CTT) High Voltage Power Supplies

PESP 2008
Jefferson Lab
October 2, 2008

Uwe Uhmeyer
Kaiser Systems, Inc.
Beverly, MA

Insulated Core HV Transformers ICT

- In use for many years
- Secondary windings in close proximity to secondary core sections
- Multiple Gap design
- Flux leakage occurs at fringes of gaps.



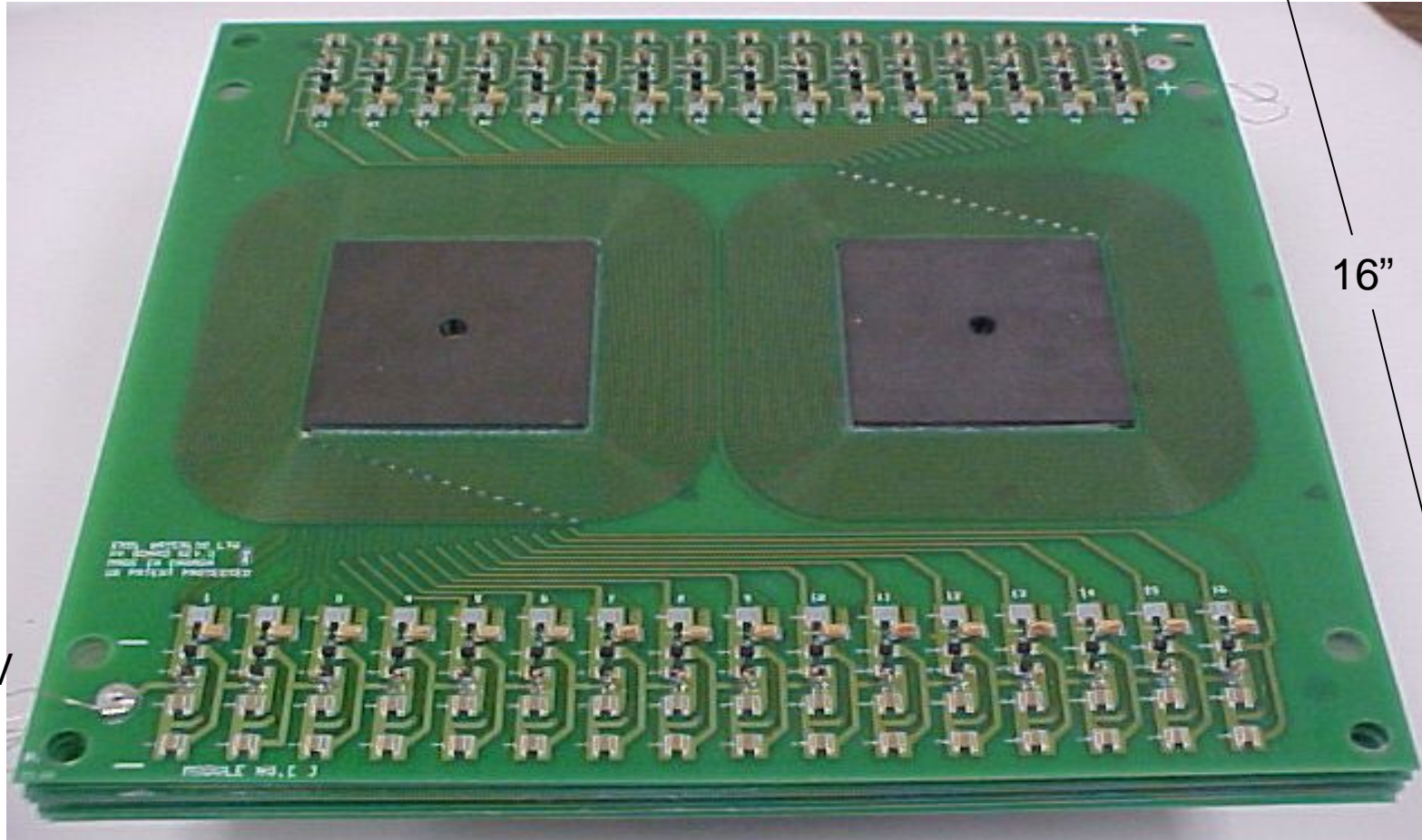
Conceptual Diagram

(Middle phase ckts not shown)

CTT Stack Card Building Block

12.5kV, 100mA

12.5kV

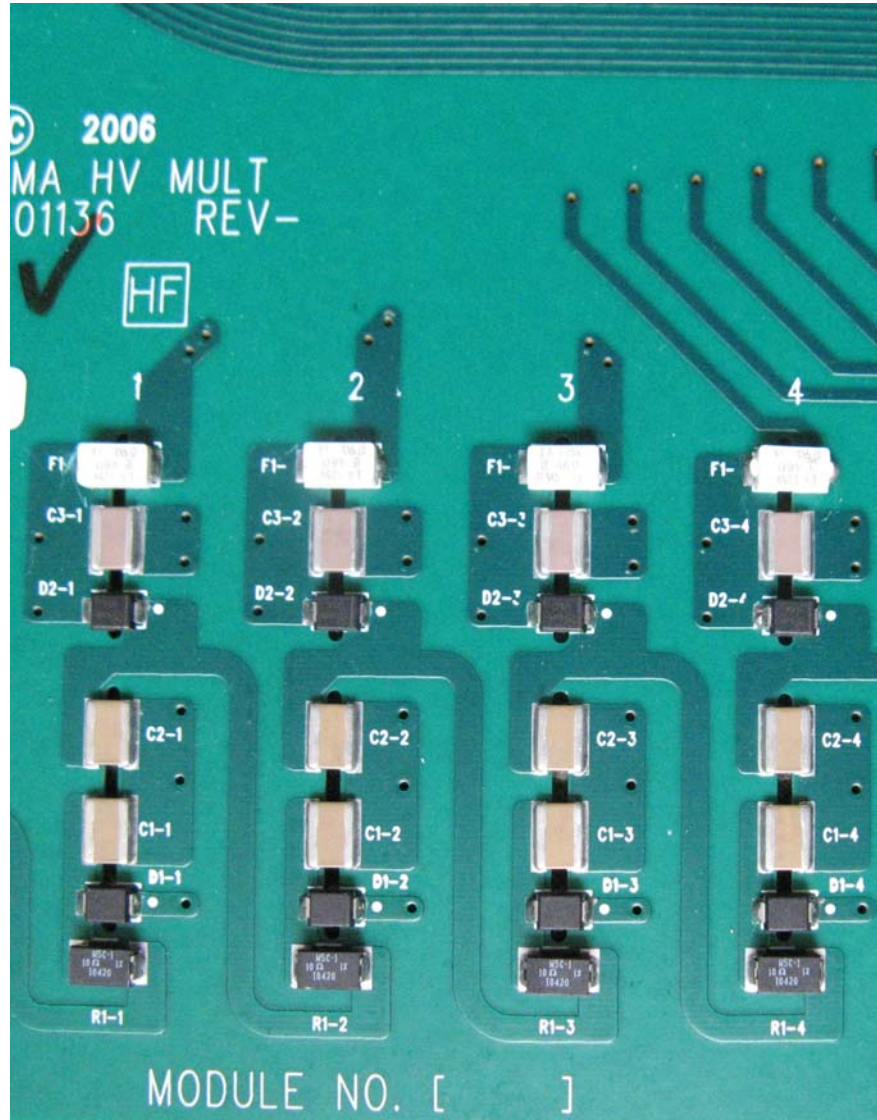


0 V

16"

CTT Stack Card Building Block

- Zoom in on 4 elements



This Document Contains Confidential Information Proprietary To Kaiser Systems Inc.

1 Element of CTT Stack Card

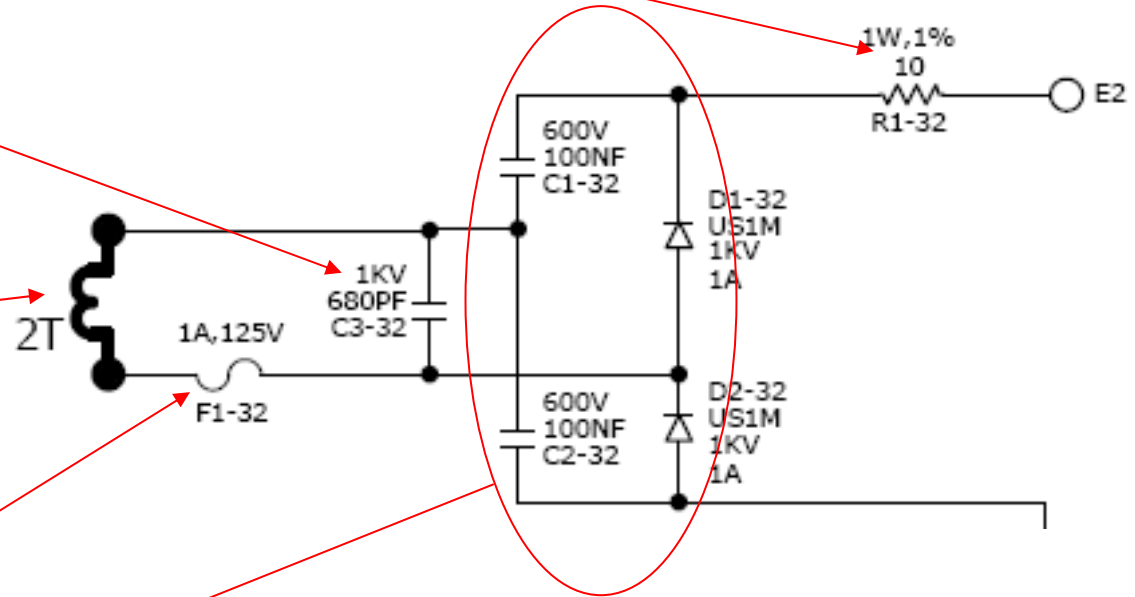
- Output series limiting resistor

- Flux Compensation Capacitor

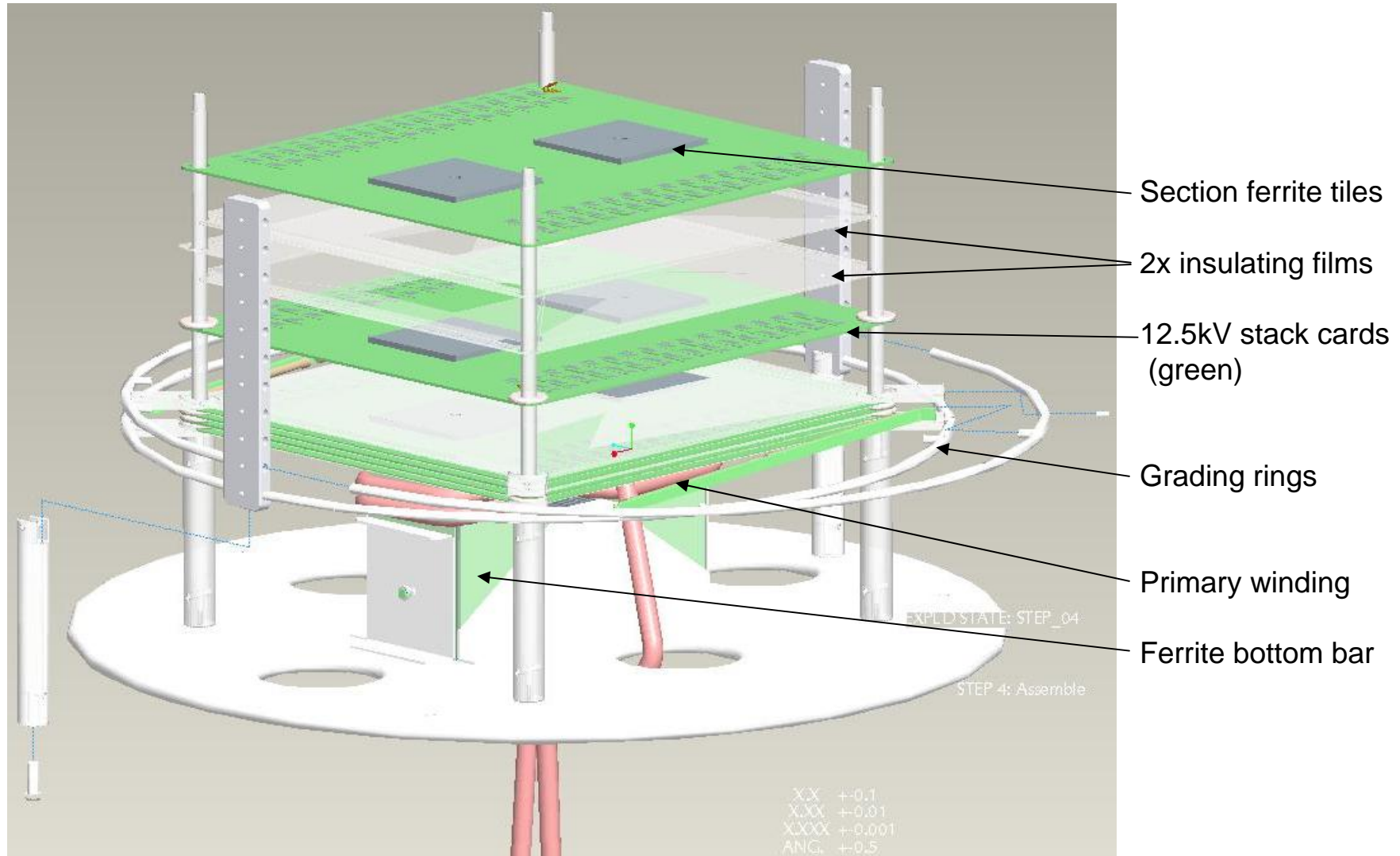
- Planar secondary xfmr windings
 $N_{typ} = 2/5$

- Per element fuse

- Voltage Doubler

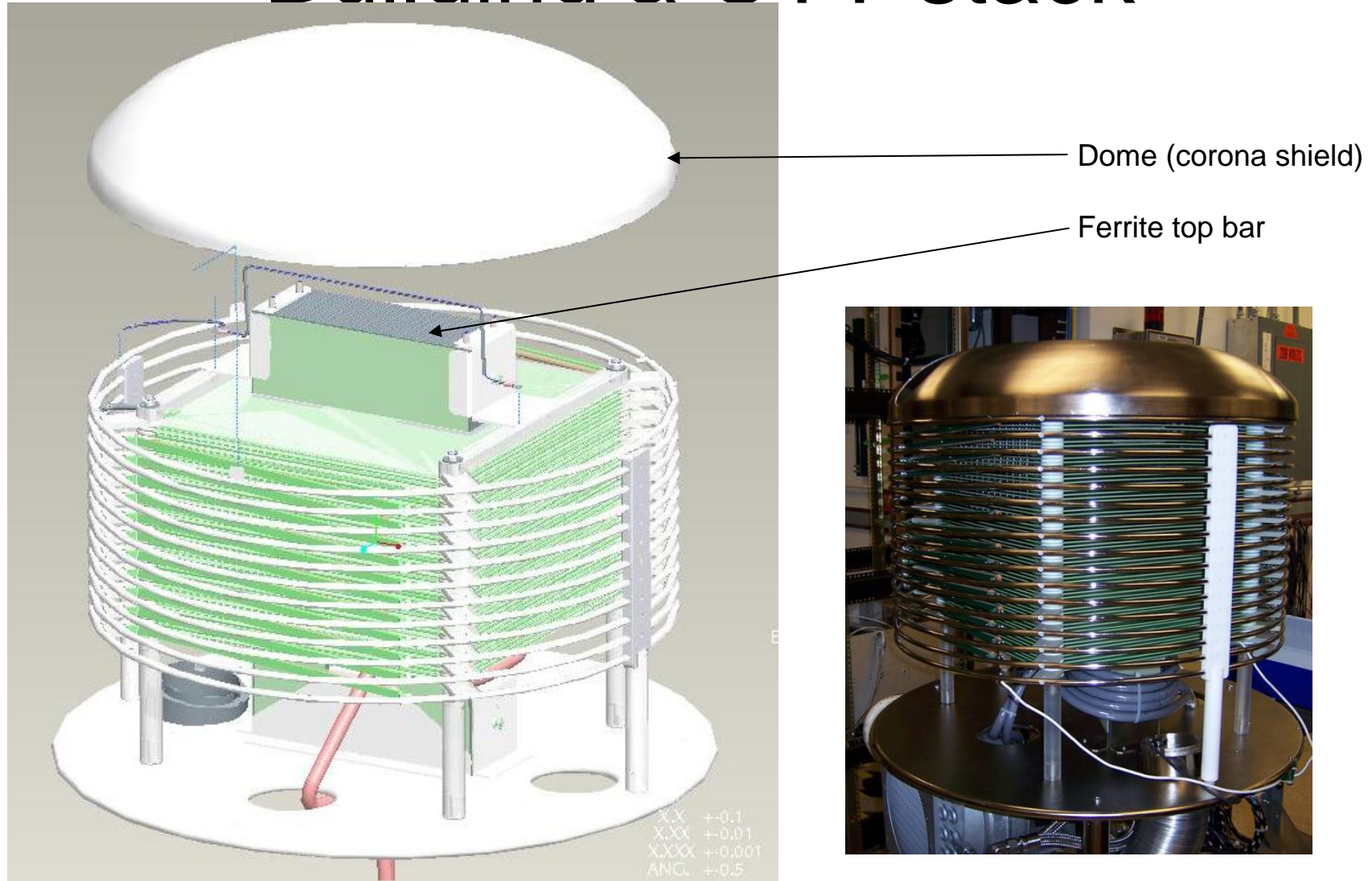


Building a CTT stack



This Document Contains Confidential Information Proprietary To Kaiser Systems Inc.

Building a CTT stack



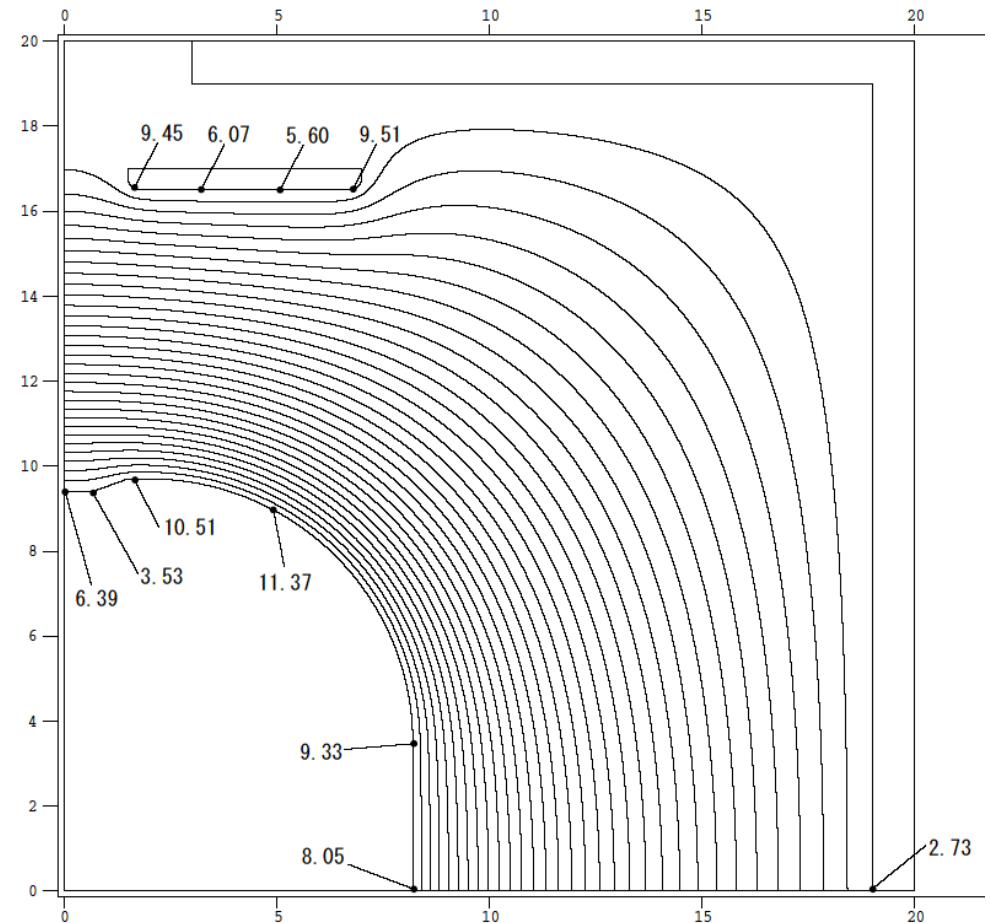
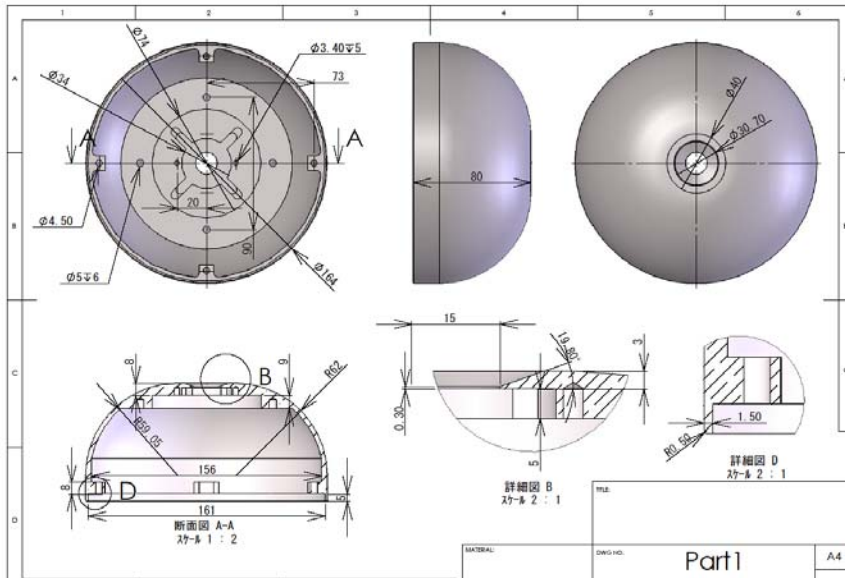
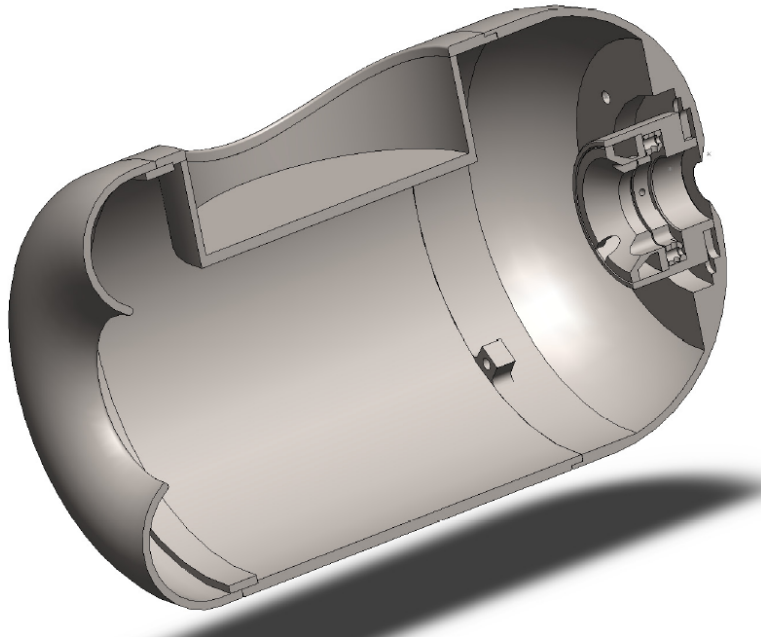
This Document Contains Confidential Information Proprietary To Kaiser Systems Inc.

5. カソード電極の設計

カソード・アノード間距離 約7cm

アノード中心穴径 $\phi 30\text{mm}$

条件での等電位線・電界強度分布



500kV電子銃2号機開発の今後の予定

- ・最終仕様書のまとめ
 - ・電子銃Chamber
 - ・高圧電源
 - ・セラミック管
 - ・クライオポンプ

納期の関係からこれらは8月末～9月初旬を目処に。

- ・電子銃支持機構の設計
- ・電極周り(サポート管、調整機能)の設計
- ・新しいカソード準備装置の設計

カソード準備Chamber(活性化システム)は、電子銃系の設計がほぼ完了した段階で進めてゆく予定。

予算、納期的に今年度で全て揃えるのは厳しい見込み。200kV電子銃活性化システムの流用を含め、段階的に新しい活性化システムを立ち上げてゆく。