

主加速器空洞入力カプラー現状開発報告

--東CHでのカプラー1号機の液体窒素下パワーテスト結果--

2011/05/13

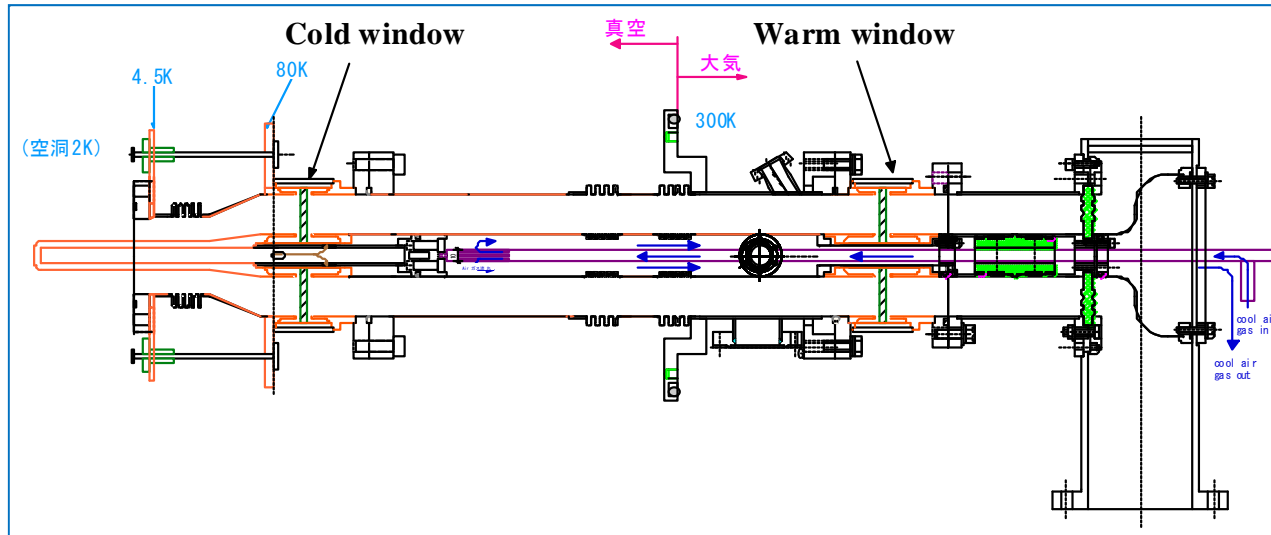
阪井寛志、梅森健成、沢村勝、
篠江憲治、古屋貴章、Enrico Cenni

Contents:

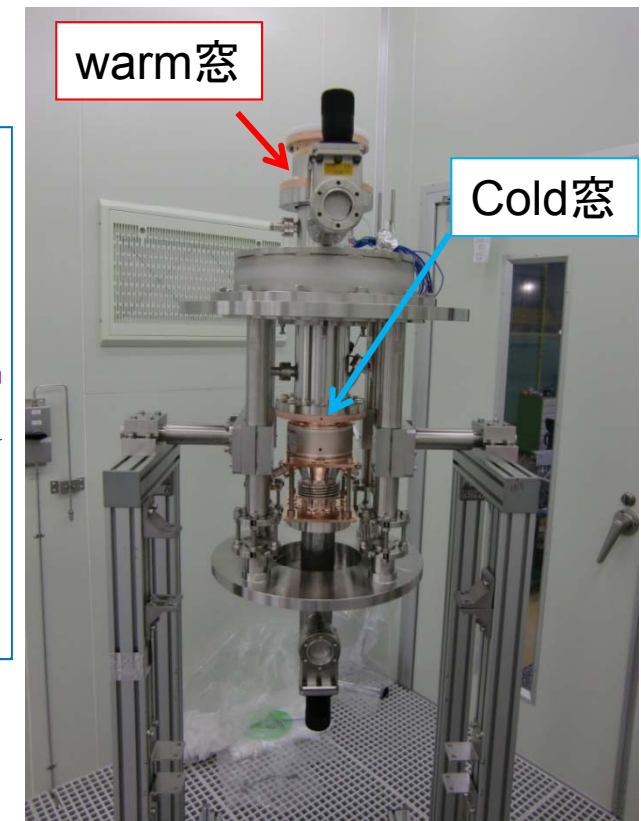
- 1号機LN2冷却下でのハイパワーテスト
- 1号機改良cold窓のthermal cycle test
- まとめと今後

カプラー1号機

カプラー1号機のデザイン



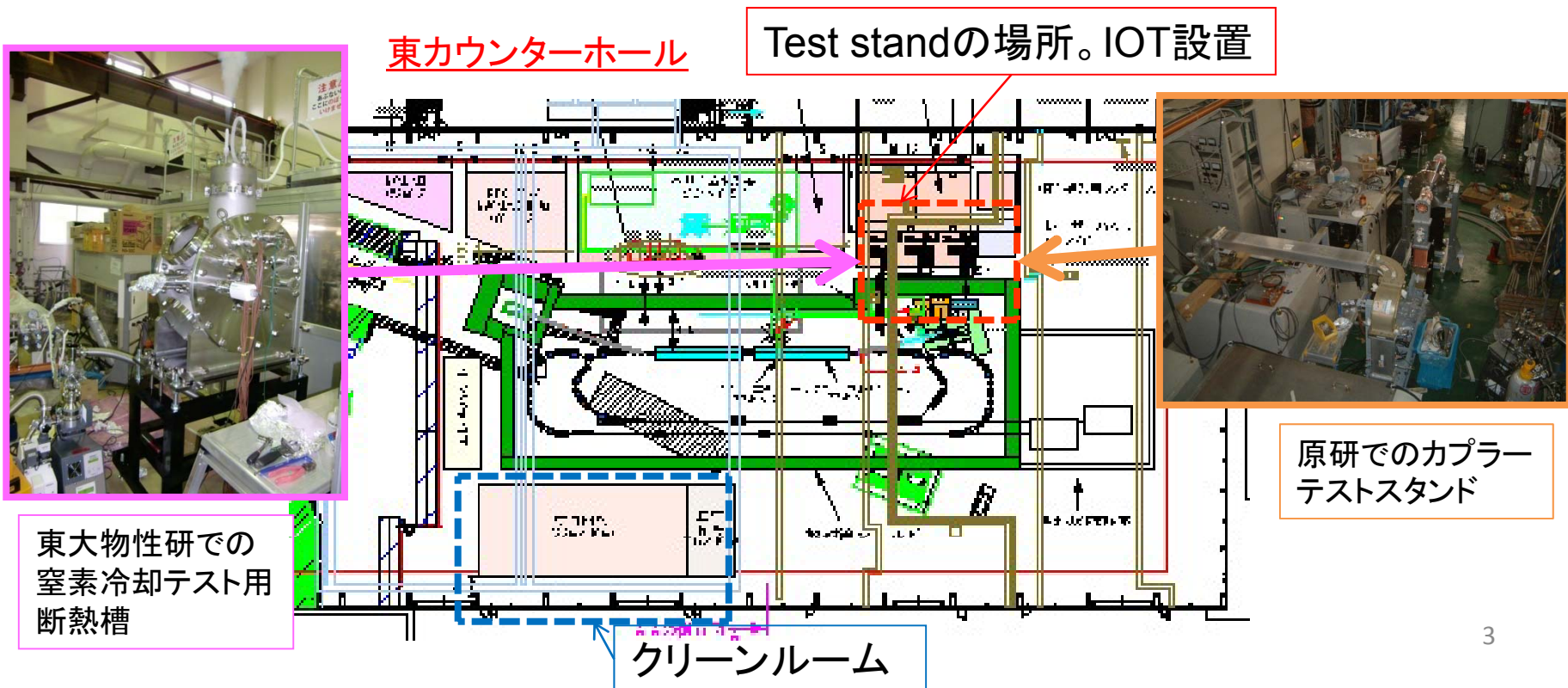
Spec : 1.3GHz, 20kW CW standing wave



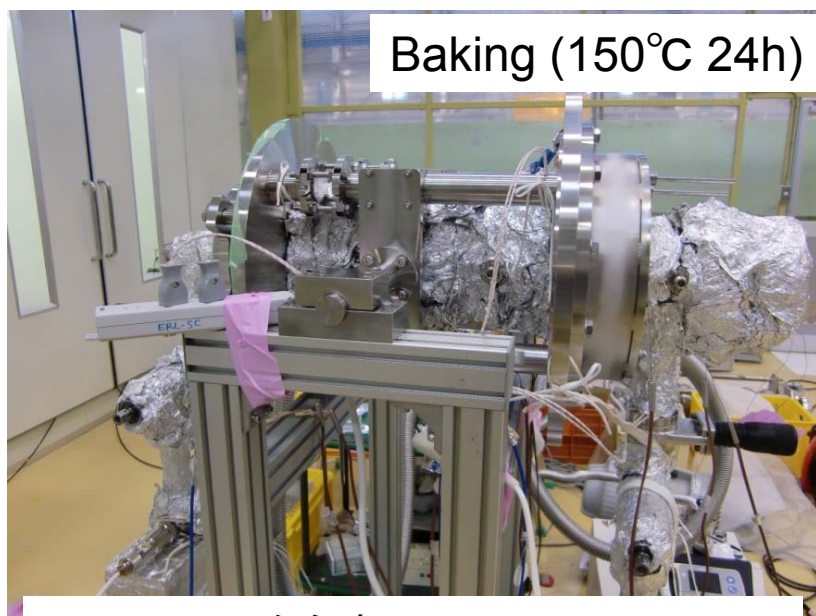
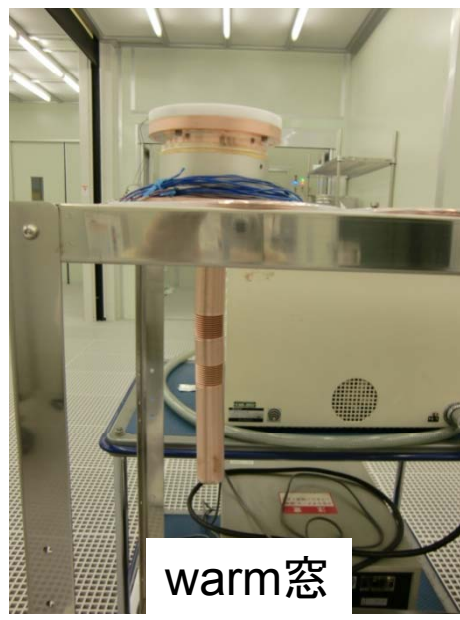
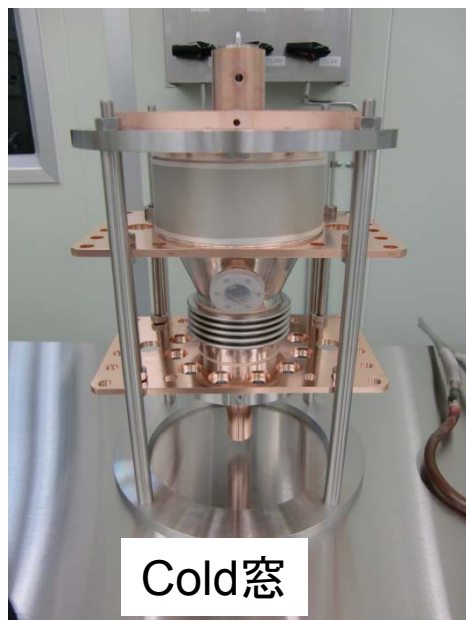
- ・Warm窓までは2009年度3月に納入。Cold窓が2010年度9月末に納入。ドアノブは今までの原研でのパワーテストのものを使用。
- ・モジュールに組み込みを考慮するためにベローズの位置を設計。特に定在波の運転なのでRFのpeakがベローズに来ないようにした。セラミック窓にもピークが来ない設計となっている。
- ・カプラーはvariable。±5mm動く設計。(Qext = $5 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$ で設計。)

カプラー1号機ハイパワーテスト準備

- 改良Cold窓単体のパワー試験までを原研(JAEA)にて行った(2010年4月まで)。窓単体のRF設計はOK。2010年度秋以降にこのテストスタンドを9月に原研から移設して、カプラー1号機の測定を東カウンターホールに展開。
- 30kW IOTはRF Grp.が2010年11月までに立ち上げ、動作確認を行った。
- また、2010年度からはクリーンルーム(class 4)も東カウンターホールに準備し、クリーンルームの整備を行い、組み立てをそこで行えるように準備した。
- カプラー等の液体窒素冷却テストを行っていた断熱槽を10月に東大物性研から持ってきて窒素冷却下でのパワーテストを行えるように準備した。



カプラーテストスタンド組み上げ(clean room 作業 & baking)(写真)



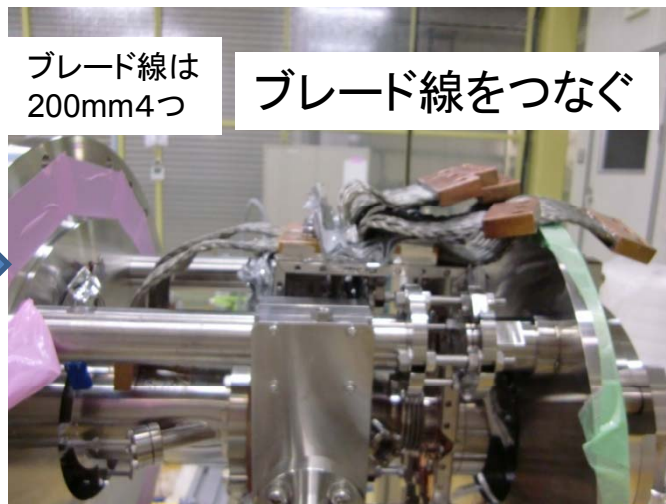
Clean roomから出てleak check&baking

断熱槽への取り付け(写真)

断熱槽へ入れたのち、カップラーと断熱槽を接続し、その後、横ポートからカップラーサポート用の柱のスタッドボルトを外す。Cold Boxをすべて閉じる。



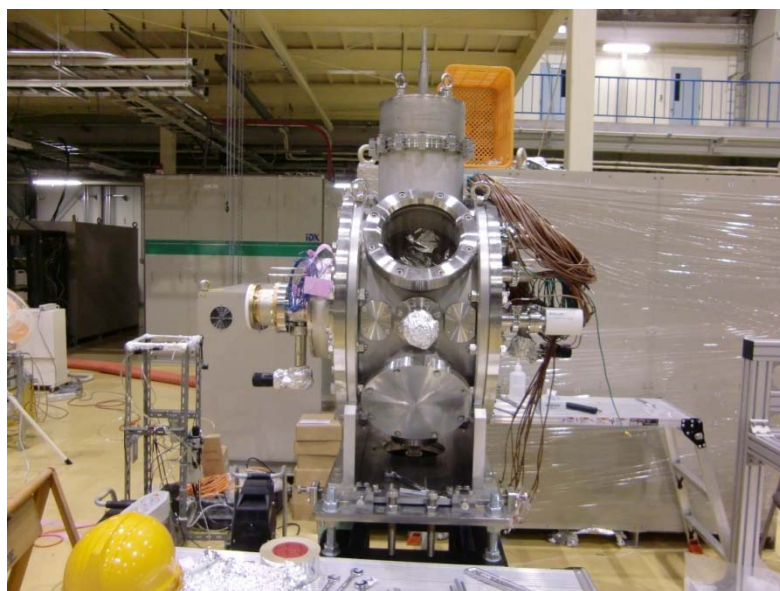
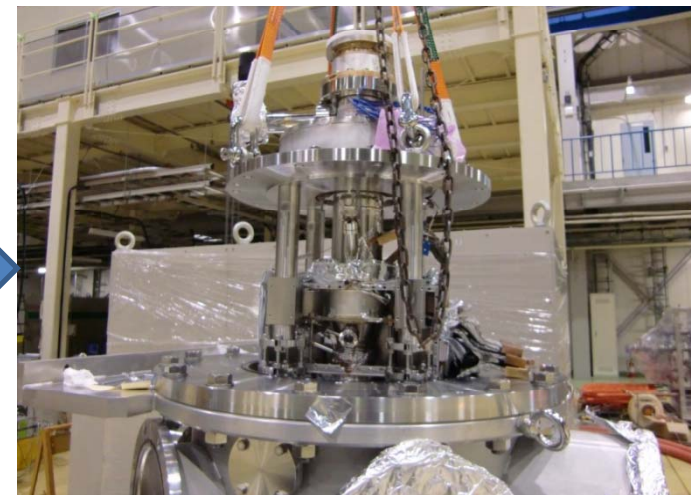
Cold BoxにSIを10枚巻く。



ブレード線は200mm4つ

ブレード線をつなぐ

SIでCold窓部フランジを巻く。 クレーンをつり下げた状態で熱電対をある程度付ける。

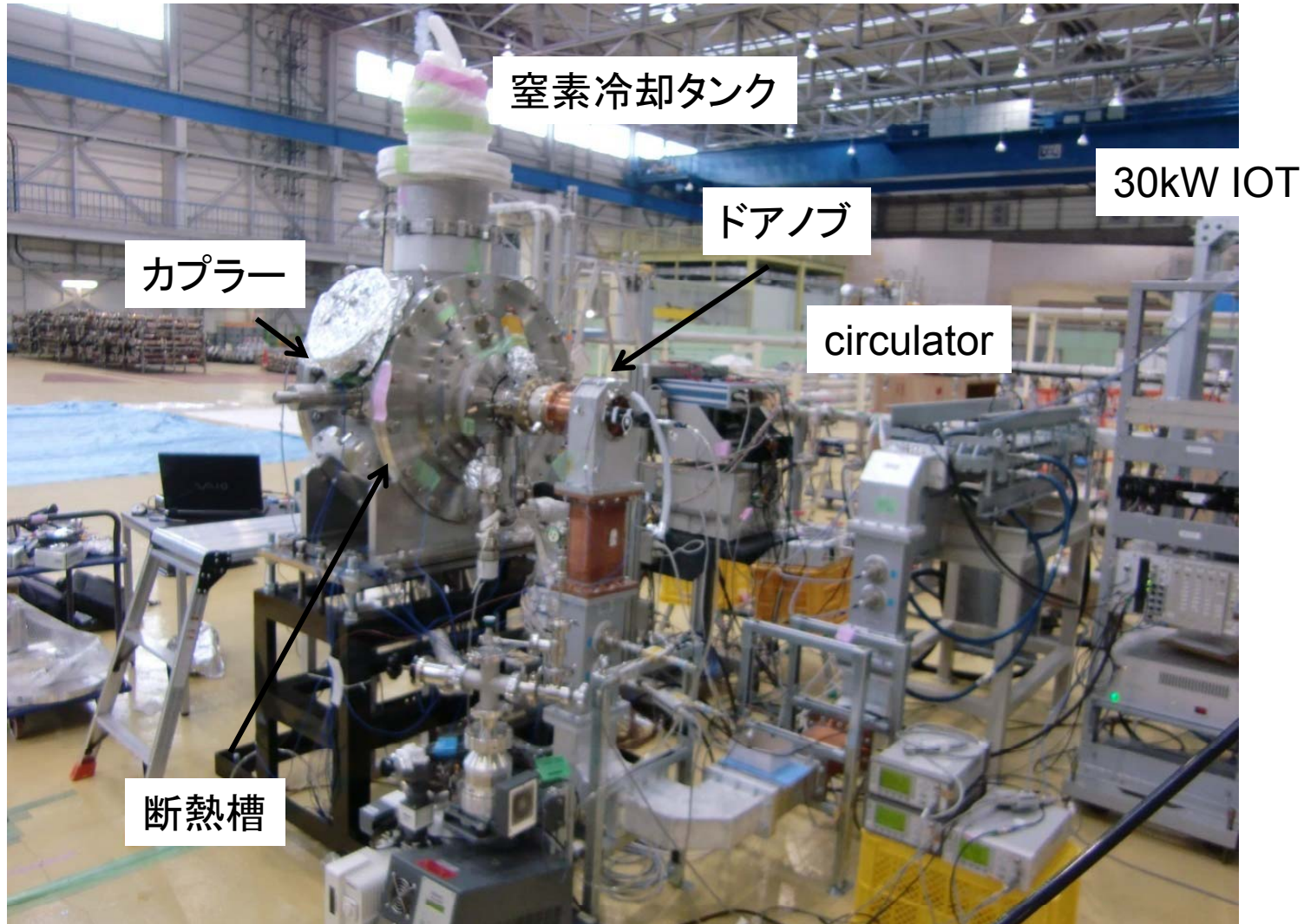


断熱槽用の架台に移し、窒素溜めを上から入れる。その後、ブレード線をつなぎ、残りの熱電対を接続。



断熱槽内で柱をとり、断熱槽を回転させる。

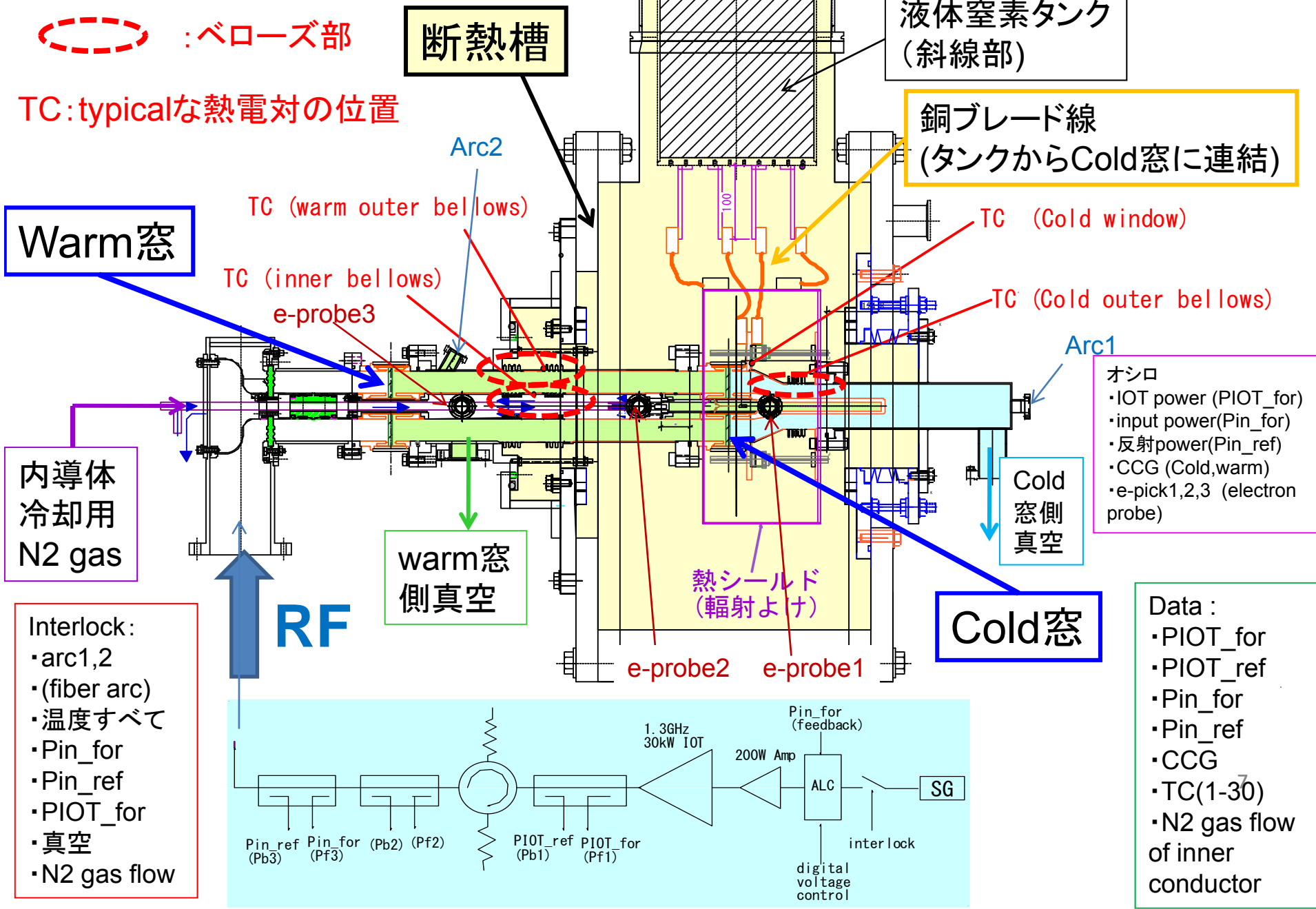
カプラーTest stand @東カウンターホール(写真)



テストスタンドにドアノブを通じ、導波管をつなぎ、イオンポンプ&モニターをつけ、テストスタンドの設置終了。

High power test setup(概要)

定在波で25kWまでテスト



ベローズ部

断熱槽

液体窒素タンク (斜線部)

銅ブレード線 (タンクからCold窓に連結)

TC: typicalな熱電対の位置

Warm窓

内導体冷却用 N2 gas

Interlock:
 ・arc1,2
 ・(fiber arc)
 ・温度すべて
 ・Pin_for
 ・Pin_ref
 ・PIOT_for
 ・真空
 ・N2 gas flow

RF

warm窓側真空

e-probe2 e-probe1

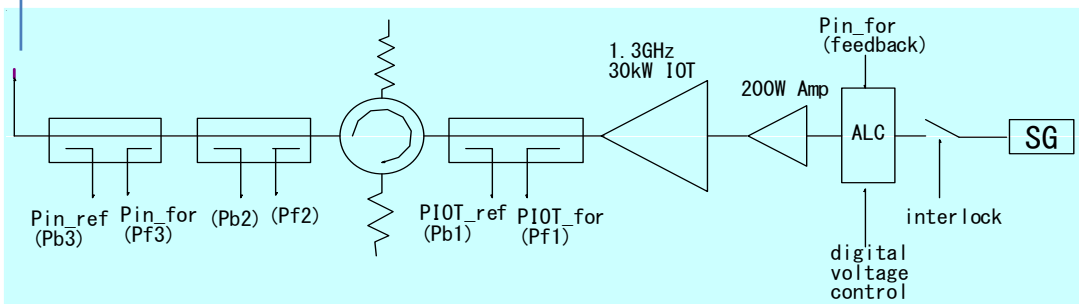
熱シールド (輻射よけ)

Cold窓

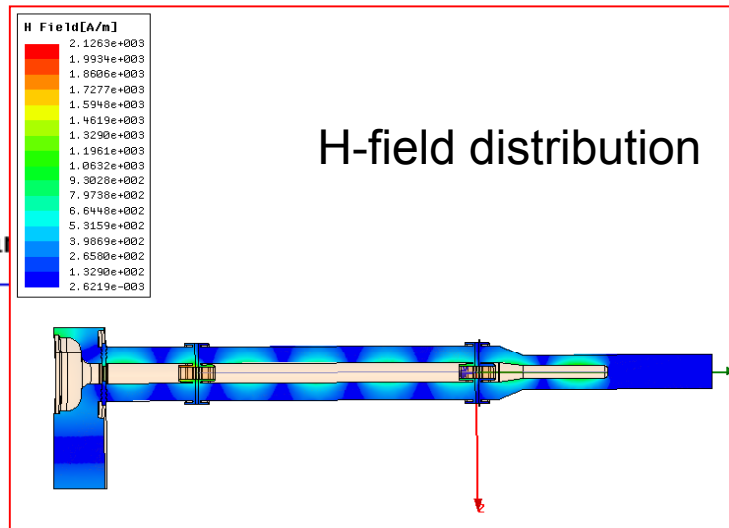
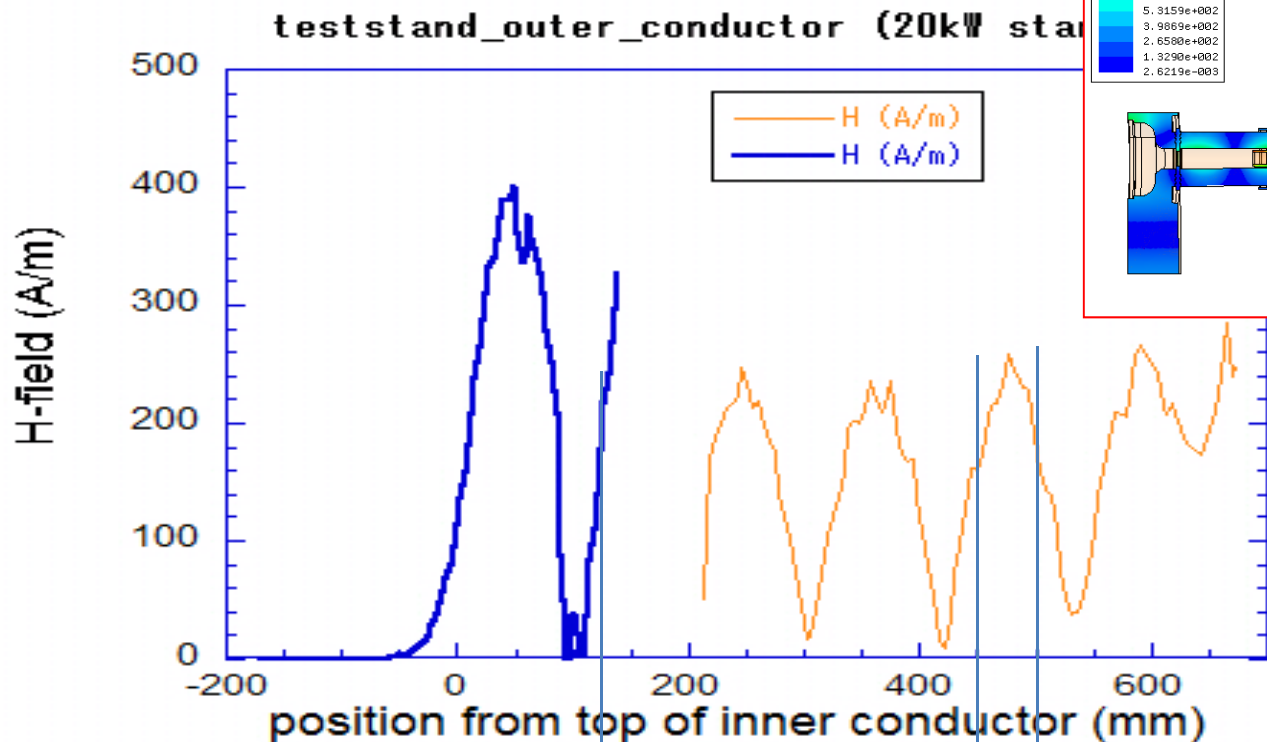
Cold窓側真空

オシロ
 ・IOT power (PIOT_for)
 ・input power (Pin_for)
 ・反射power (Pin_ref)
 ・CCG (Cold, warm)
 ・e-pick1,2,3 (electron probe)

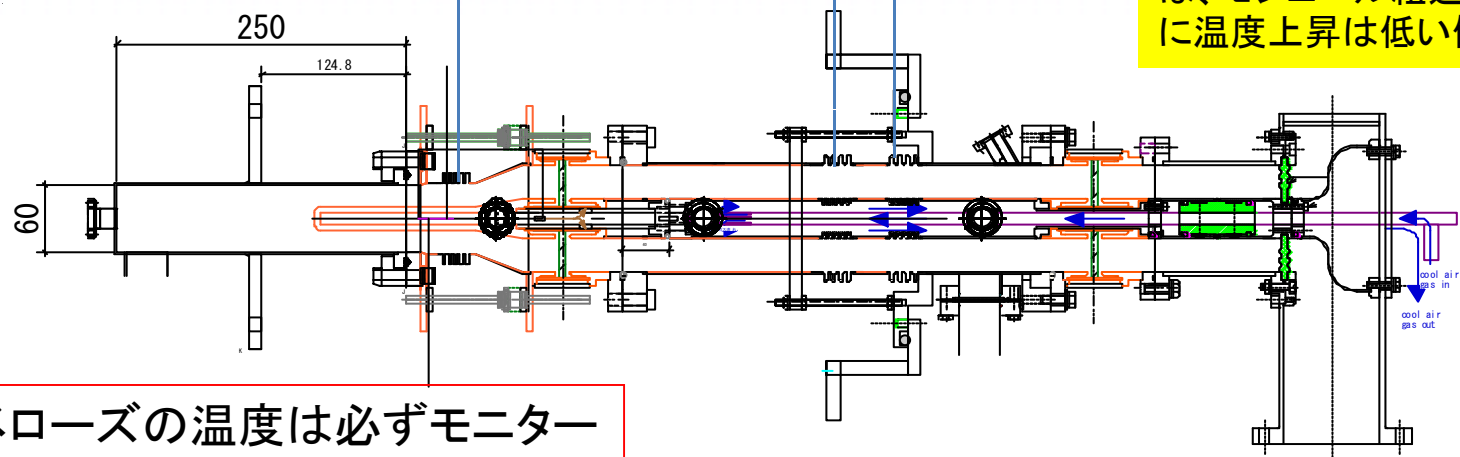
Data:
 ・PIOT_for
 ・PIOT_ref
 ・Pin_for
 ・Pin_ref
 ・CCG
 ・TC(1-30)
 ・N2 gas flow of inner conductor



RF behavior of coupler test stand (HFSS calculation)



定在波の様子。図は磁場の分布(計算)。ベローズにはピークが来ないように設計である。なお、常温では磁場ピークが外導体のベローズ間に来るが、低温運転ではベローズ間が磁場が minimumになる。したがって、今回の温度上昇が問題なければ、モジュール組込時にはさらに温度上昇は低い値となる。



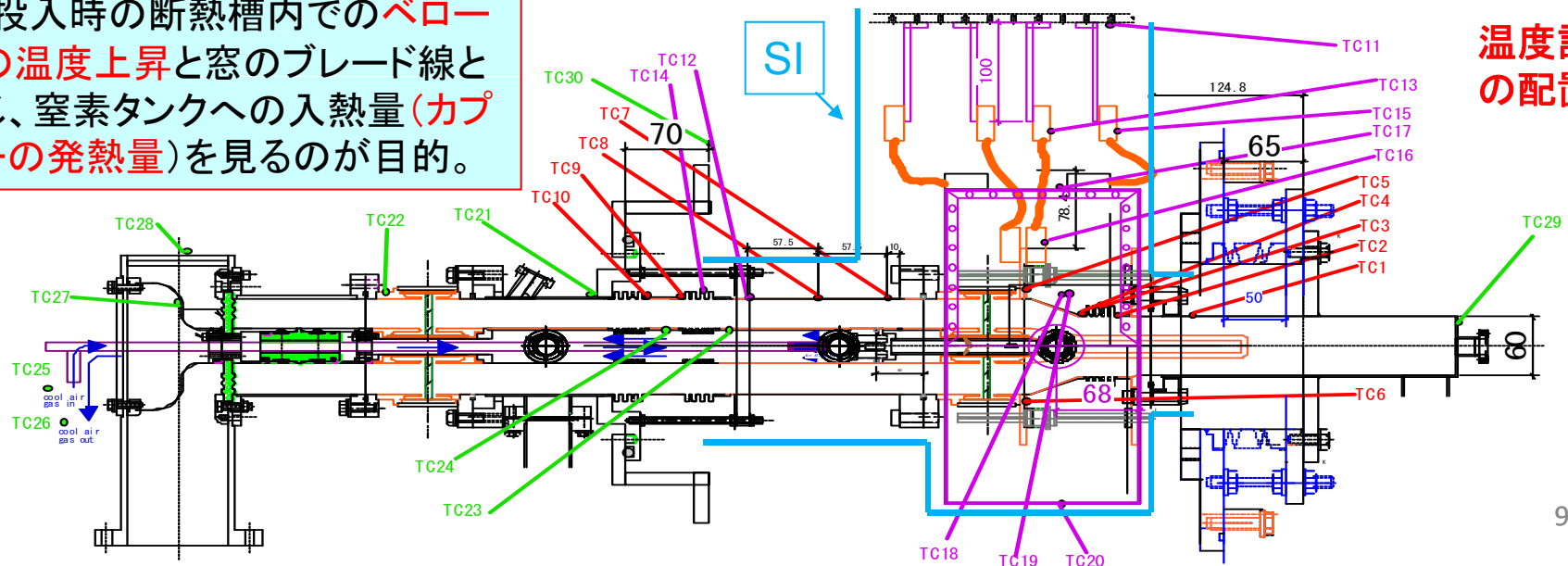
ベローズの温度は必ずモニター

熱電対Data assign & 熱シールド詳細

赤字は窓とベローズの部分

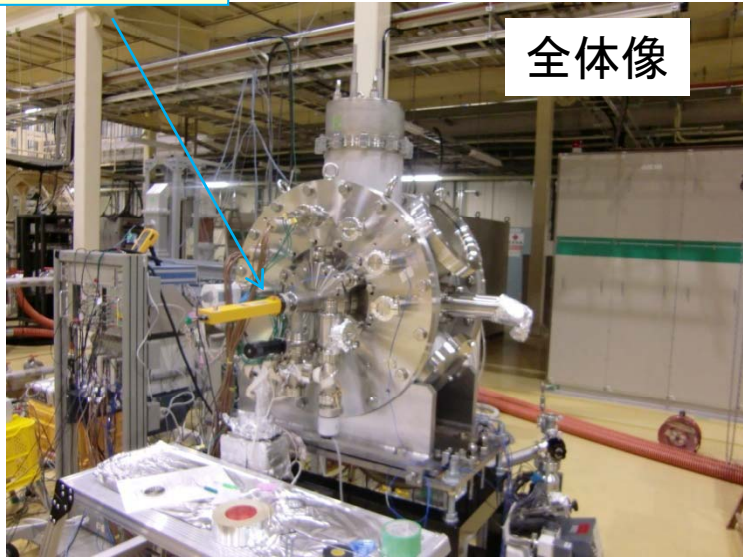
	T1 (in vac. insulator) (図の赤)	T2(in vac. insulator) (図の紫)	T3 (out of vac .insulator) (図の緑)
ch1	Cold窓端板 (in vac)	Liq N2 tank	Warm outer (out)
ch2	Cold bellows (lower)	Warm outer(125mm)(H-節)	Warm 窓
ch3	Cold bellows (middle)	Blade (3) to Cold窓	Warm inner conductor(down)
ch4	Cold bellows (upper)	Warm outer bellows (cold side middle)	Warm inner conductor (middle)
ch5	Cold窓 (upper)	Blade (4) to Cold Box	Cooling N2 gas in
ch6	Cold窓 (lower)	Blade (3) at Cold窓	Cooling Ns gas out
ch7	Warm outer (10mm)((H-節)	Cold Box (top)	Doorknob
ch8	Warm outer (67.5mm) (H-山)	Cold Box (side 1)	Doorknob end plate
ch9	Warm outer bellows (middle1)	Cold Box (side 2)	Cold窓端板 (out)
ch10	Warm outer bellows (middle2)	Cold Box (bottom)	Room temperature

RF投入時の断熱槽内でのベローズの温度上昇と窓のブレード線と通じ、窒素タンクへの入熱量(カップラーの発熱量)を見るのが目的。

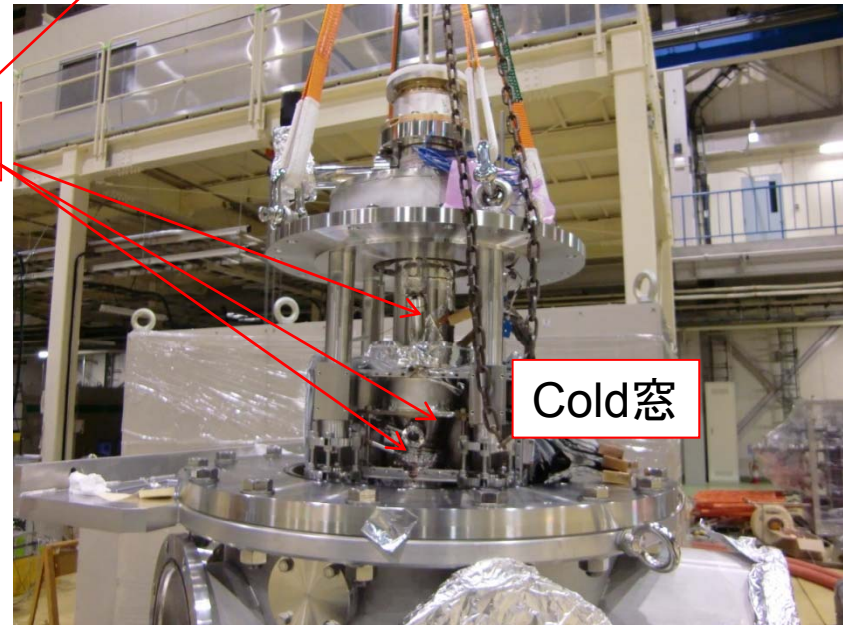
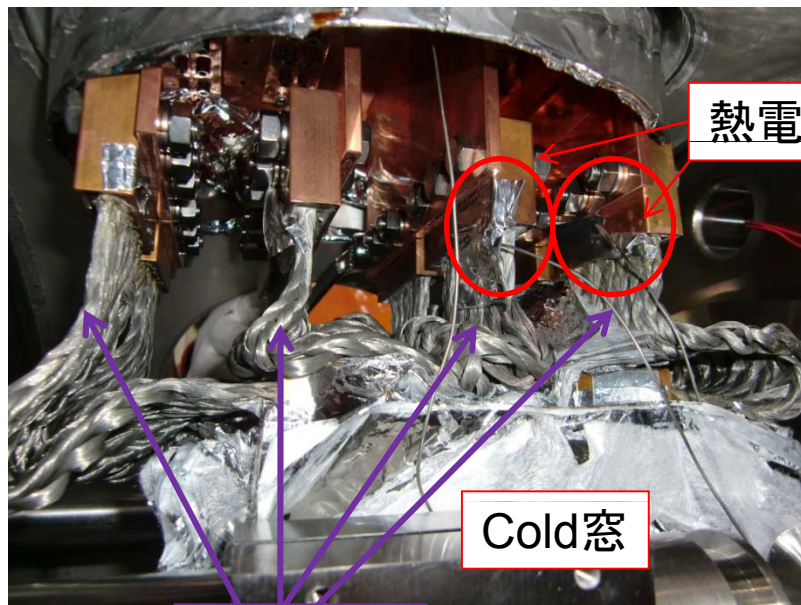
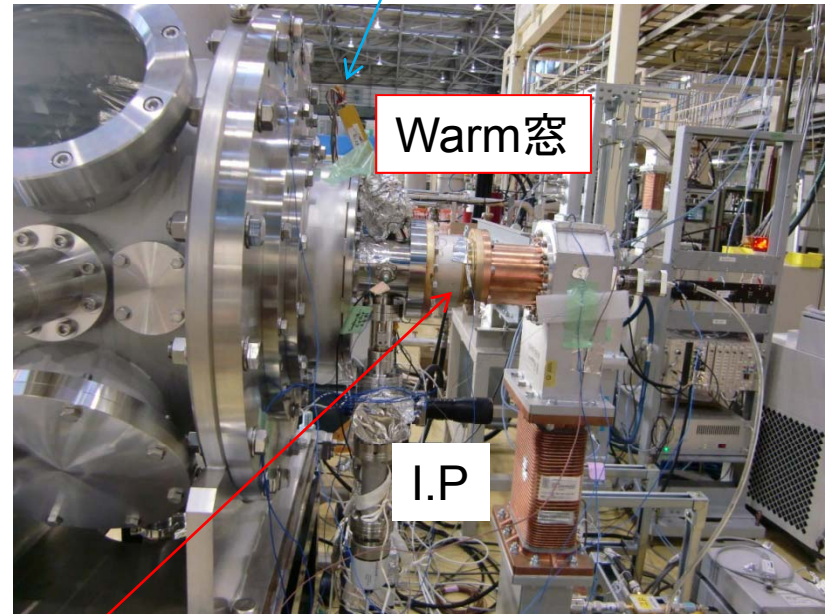


Setup(写真1)

Arc sensor1

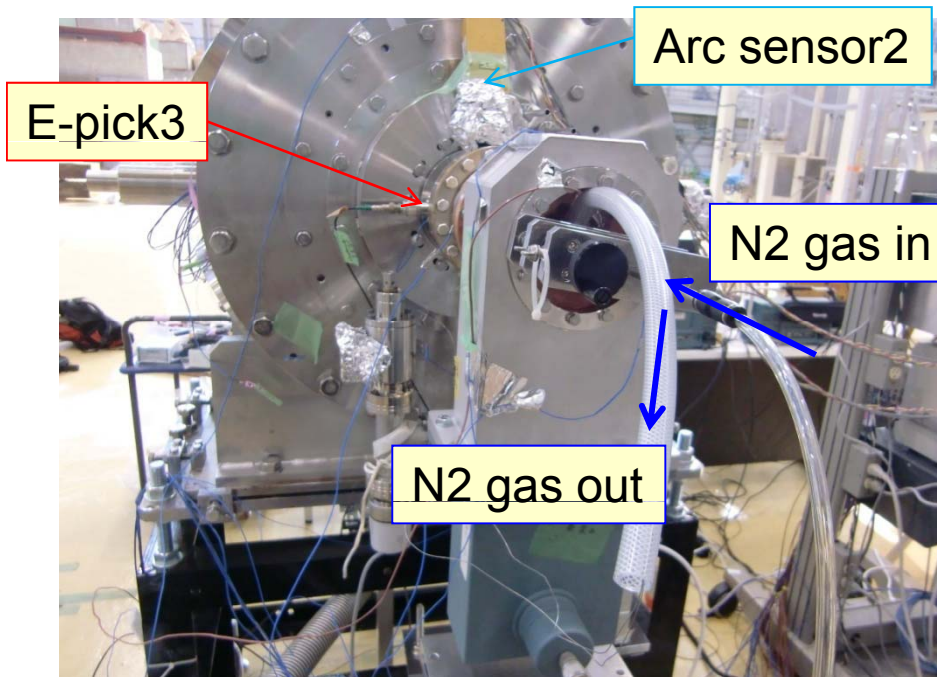
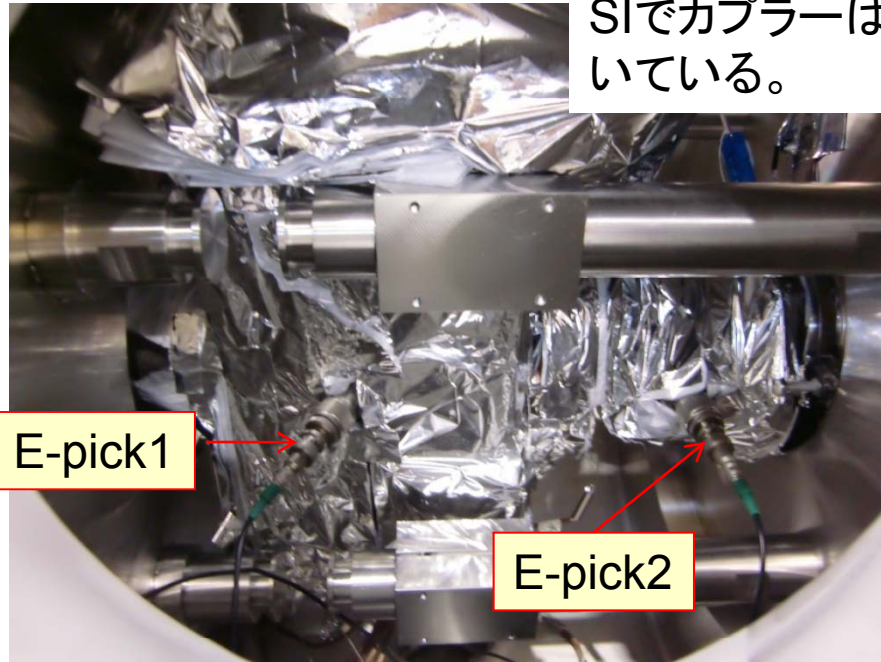


Arc sensor2



Setup (写真2)

断熱槽内の様子
SIでカプラーは巻
いている。



液体窒素を入れている様子

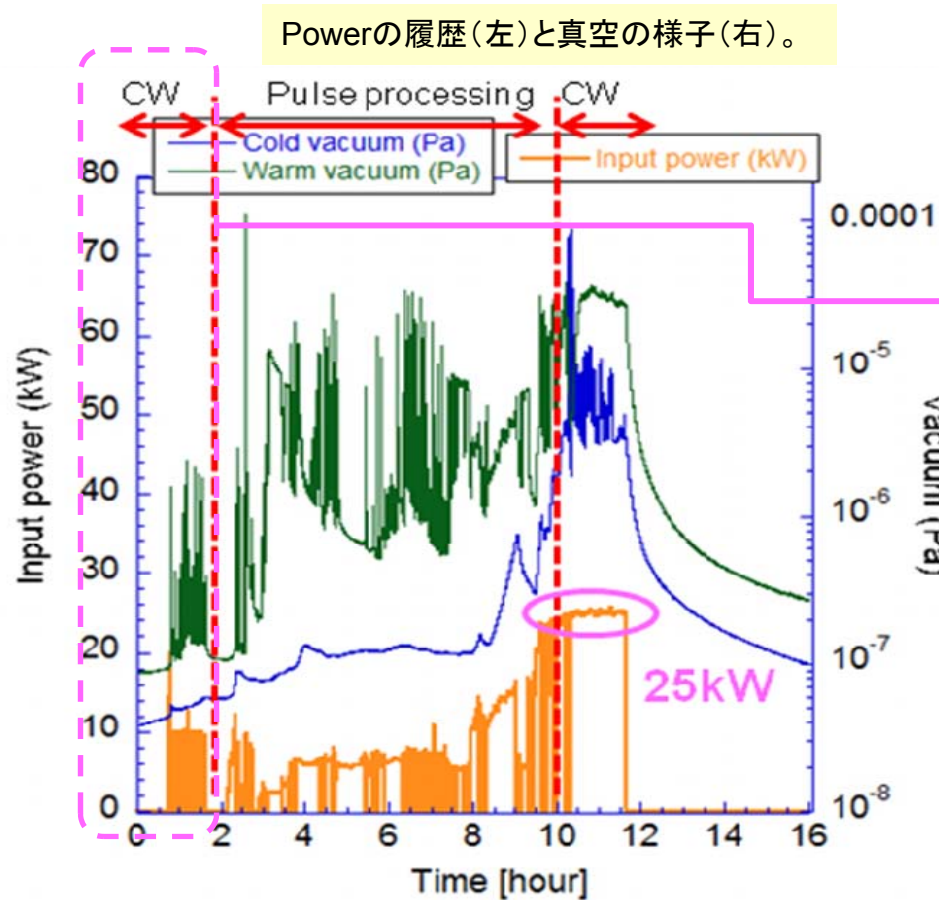


- ・Cold窓側とwarm窓側は独立にI.Pを設置。
- ・warm外導体部は、全てSIを巻く。
- ・内導体空冷用N2 gas用のラインを整備。
熱電対はN2 gas out ラインに出し、パワーを入れない時は管を折り、封じる。
- ・液体窒素タンクの容量は8ℓ。上から入れる。

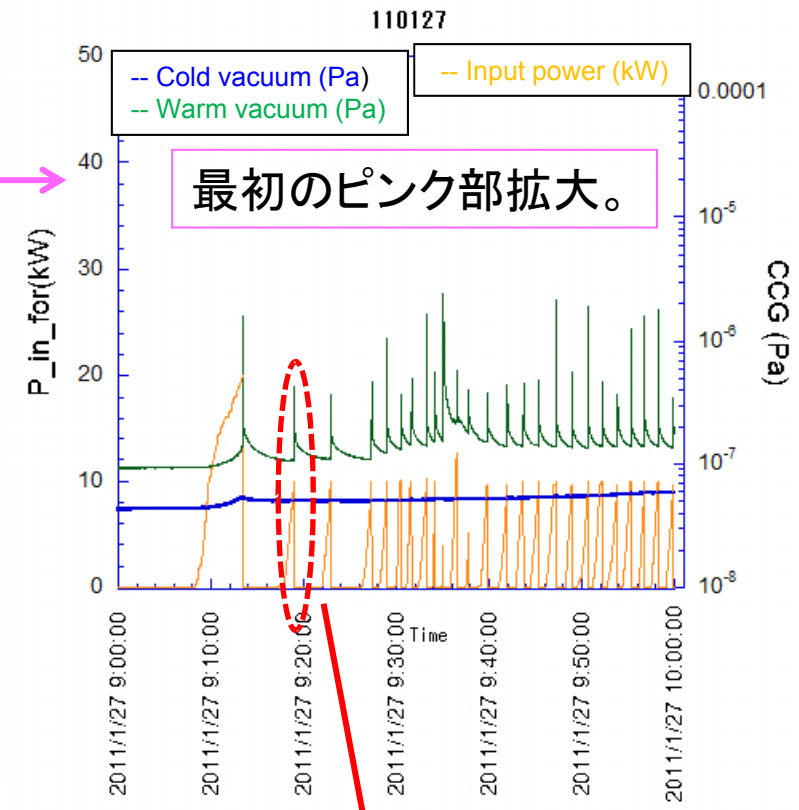
カプラーテストhistory

日程	Study items	備考
1/24(Mo)	5kW power keep (under LN2 cooling)	5kW keep (7hours)
1/25(Tu)	Change N2 gas hose to ½ inch. (under LN2 cooling)	Max 170l/min of N2 gas
1/26(We)	10kW power keep (under LN2 cooling)	10kW keep (7hours)
1/27(Th)	Processing up to 25kW (under LN2 cooling)	Pulse processing 6 hours
1/28(Fr)	20kW power keep (under LN2 cooling)	20kW keep (16hours)
1/29-1/30	Warm up to room temperature	1 st thermal cycle of cold window
1/31(Mo)	Check processing effect after warming up	Smoothly increase to 20kW
2/1(Tu)	N2 purge & open coupler to air atmosphere for 4 hours and pumping down	Leak check did not applied.
2/2(We)	Continue to pumping by I.P	
2/3(Th)	Cooldown to LN2 temp. & check processing effect again after opening to atmosphere	Power smoothly increase up to 24kW.
2/4(Fr)	Warming up & leak check (2 nd thermal cycle) of cold window	$3.0 \cdot 10^{-11}$ Pa m ³ /s OK

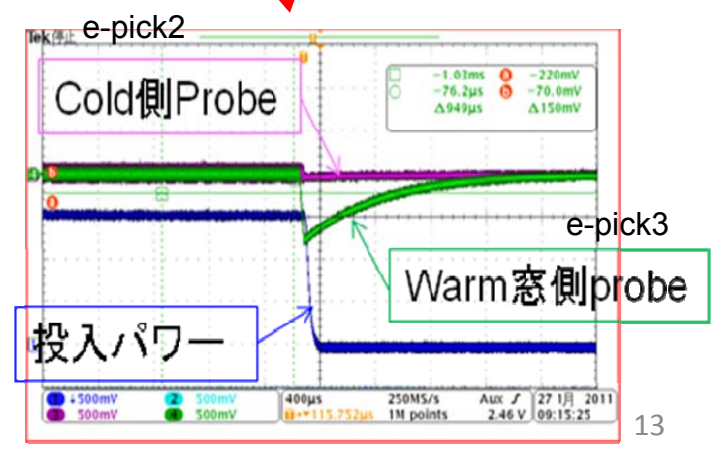
主に25kWまでのprocessingのデータと20kW keepのデータを見せる。さらにwarm up 後、一度大気にさらした後、真空に引き直した後のパワーテストのデータを見せる。¹²



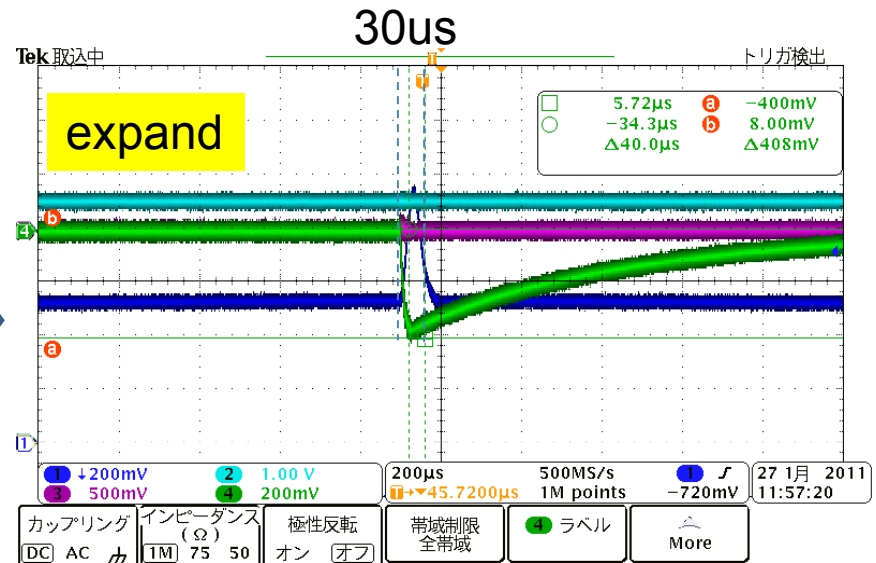
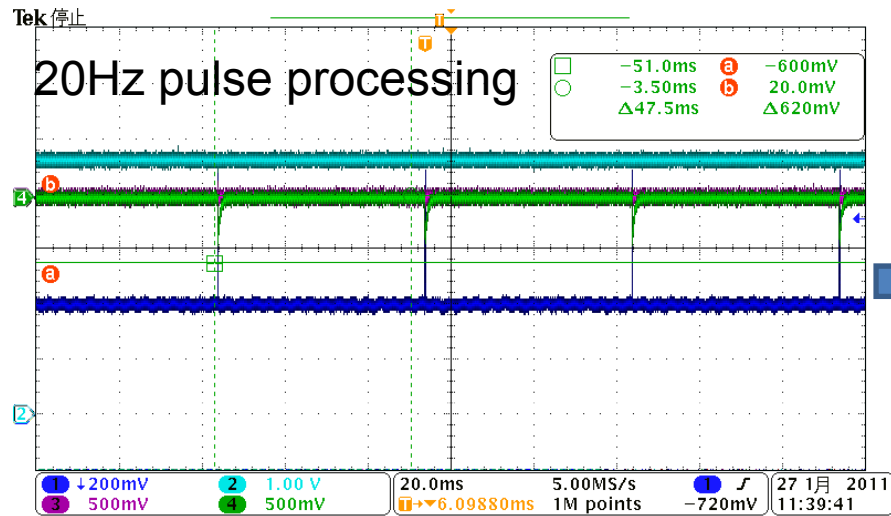
Processing up to 25kW (2011/1/27)



20kWまで到達したが、その後、arc interlockで落ちる。Warm側の真空も上昇。またそれに合わせwarm側につけていたe-probe3が大きく変化。それ以降中々パワーは10kW以上上昇せず。
 → Pulse processingに変更。8時間のpulse processingの後、CWに戻し、パワー投入。Processの効果もあり、その後、スムーズに25kWに到達。25kW近くでCold側の真空が活動的になる。但し、25kWでパワーをkeepしていくうちに真空が下がっていく様子がみられた。

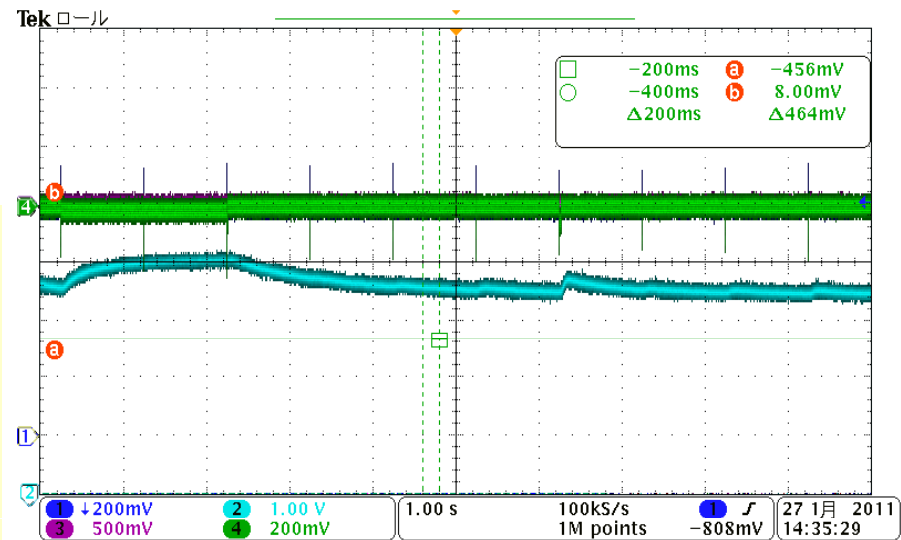


Pulse processing 中のオシロsignal



青: input power (Pin_for)
 水色: warm vacuum (CCG2)
 ピンク: electron probe (cold側) (e-pick2)
 緑: electron probe (warm側) (e-pick2)

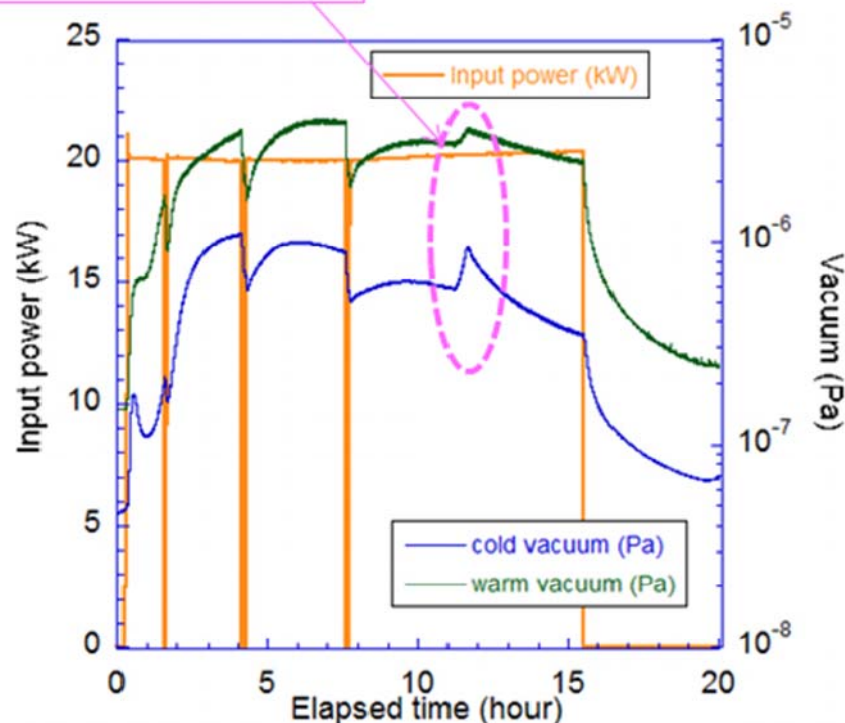
上のようにPin_forの出力にpulse幅で FWHM 30usの出力を上乗せしてprocessを行う。その際にe-pick3にpulseに合わせ、毎回シグナルが見られるのがわかる。さらに右図のようにprocessに合わせて、真空が上昇していく様子も見られる。Pulse幅やoffsetを変えながら、真空がある程度大きく出る状態でprocessを進めていった。



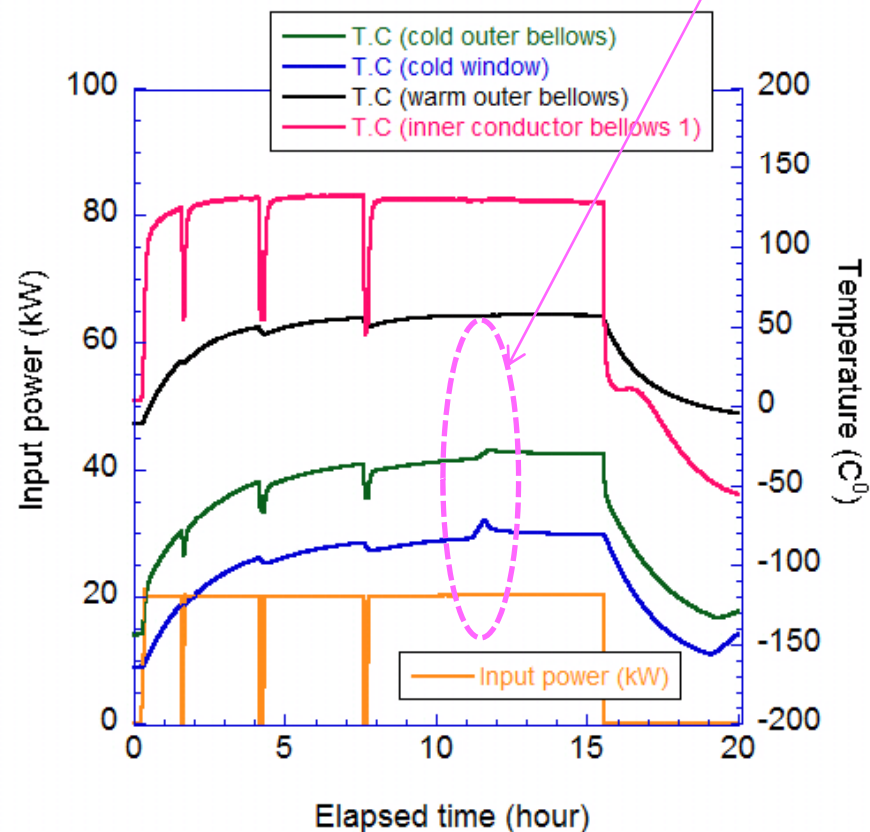
20kW keep data (2011/1/28)

power vs vac & typical temperature

液体窒素がなくなる

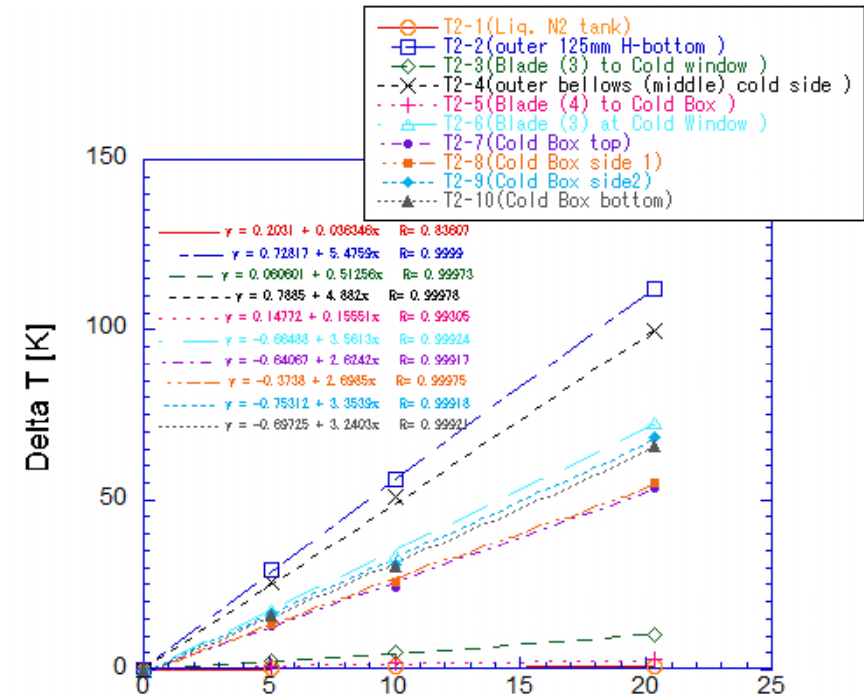
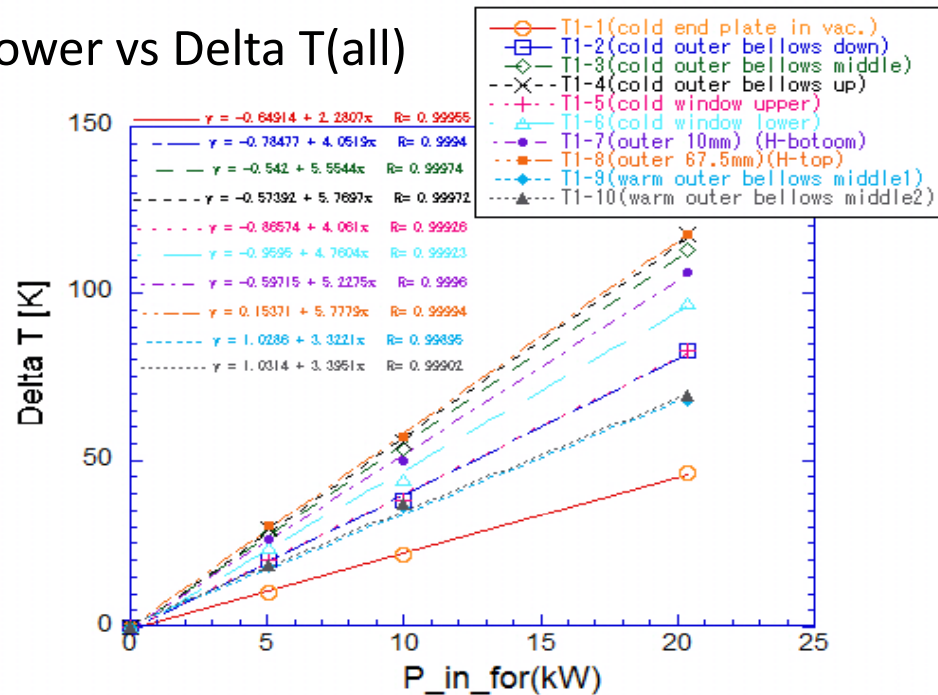


液体窒素がなくなる

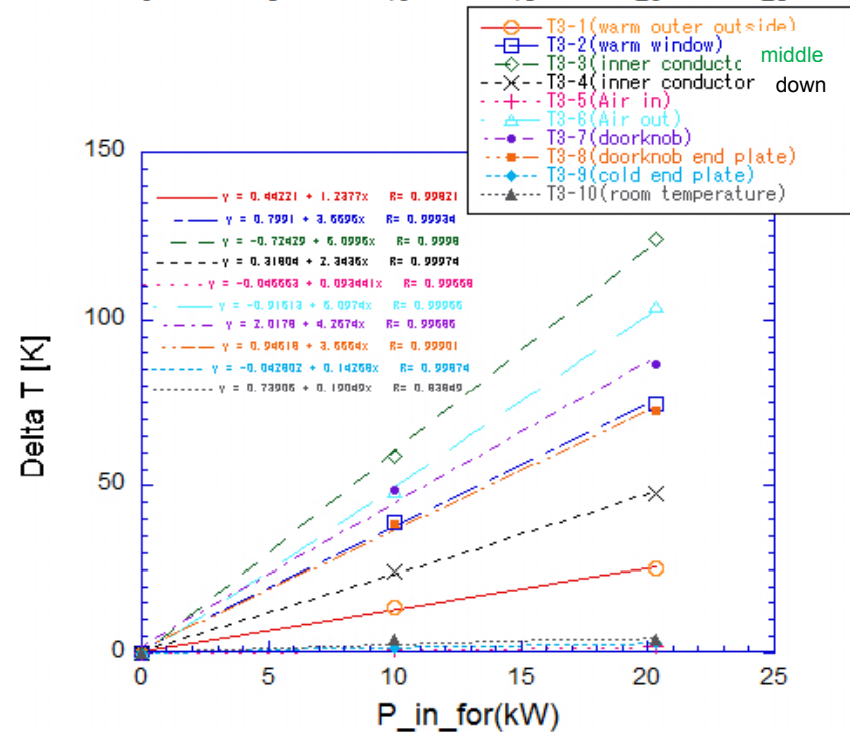


20kWを投入。Processの効果で順調にパワーが入る。真空はCold側(CCG1)が 1×10^{-6} Pa、warm側が最高で 4×10^{-6} Paまで上がるがprocessの効果もあり、その後下がっていく。パワーが途中落ちているところはarc interlockによるものだが、e-pick3も反応せず、かつ窒素を入れるときに起きており、なんらかのノイズで落ちた可能性が高い。ノイズを除き、16時間keepの後、温度がほぼ安定になった内導体の温度はN2 gasの流量が116l/minで130 $^{\circ}$ Cまであがるが、すぐ安定し、安定に合わせ真空は下降。Cold窓は83 $^{\circ}$ Cの温度上昇。但し、液体窒素冷却の効果で、温度は-81 $^{\circ}$ C。Cold側のベローズ及びwarm側の外導体のベローズの温度上昇は100 $^{\circ}$ C程度の温度上昇。

Power vs Delta T(all)



念のため、5kW,10kW,20kWのデータによる温度上昇 ΔT の相関を取った。(内導体の温度上昇データは5kWだけ流量が少ないので使用せず。(右下グラフ))きれいな相関得られているのがわかる。したがって、各パワーレベルで急激な温度上昇などが無いことがわかり、パワーロスにはmultipactingではなく、全てオーミックロスのものである。



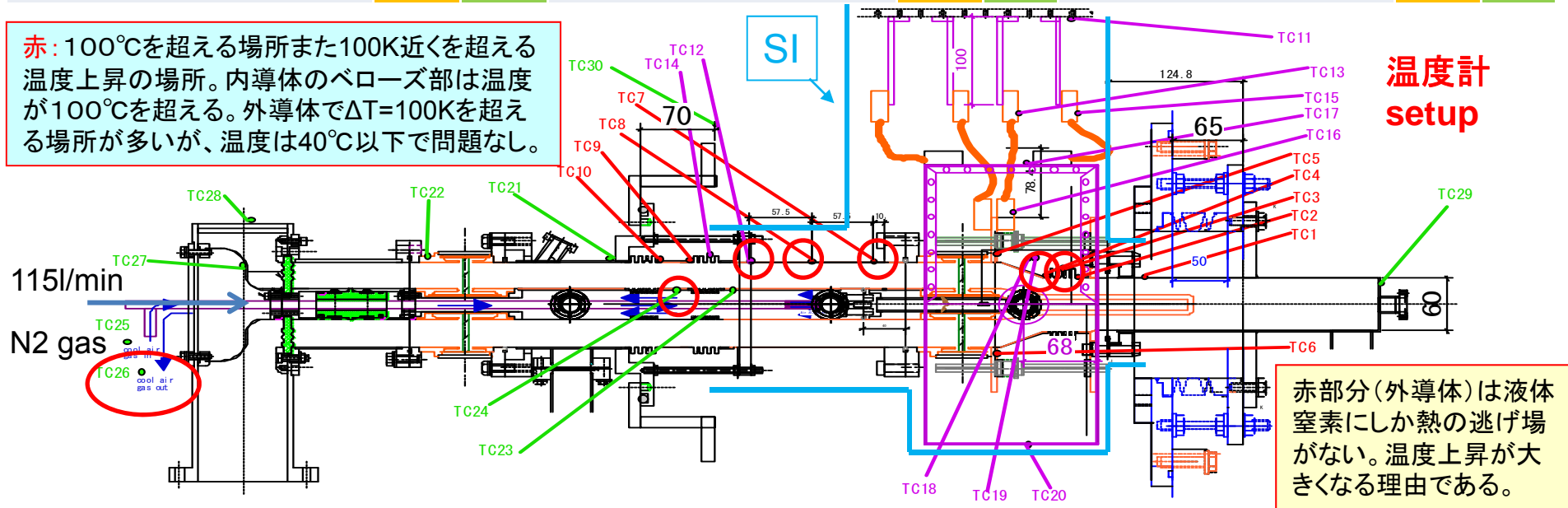
20kW keepの温度と温度上昇のまとめ

温度: 20kW平衡状態の温度

ΔT : 20kWパワー投入前後の温度差

温度計(ch&配置)	温度 (°C)	ΔT (K)	温度計(ch&配置)	温度 (°C)	ΔT (K)	温度計(ch&配置)	温度 (°C)	ΔT (K)
T1-1(cold end plate in vac.)	-11.7	46.1	T2-1(Liq. N2 tank)	-193.1	0.8	T3-1(warm outer outside)	28.2	25.2
T1-2(cold outer bellows down)	-47.7	82.5	T2-2(outer 125mm H-bottom)	32.6	111.8	T3-2(warm window)	78.9	74.7
T1-3(cold outer bellows middle)	-30.5	113.2	T2-3(Blade (3) to Cold window)	-179	10.5	T3-3(inner conductor down)	50.9	47.7
T1-4(cold outer bellows up)	-32.6	117.6	T2-4(outer bellows (middle) cold side)	55.3	99.5	T3-4(inner conductor middle)	127.5	124.1
T1-5(cold window upper)	-81.2	82.7	T2-5(Blade (4) to Cold Box)	-188.2	3.2	T3-5(N2 gas in)	8.8	1.9
T1-6(cold window lower)	-62.9	97	T2-6(Blade (3) at Cold Window)	-93.4	72.6	T3-6(N2 gas out)	108.2	103.7
T1-7(outer 10mm) (H-botoom)	-31.5	106.6	T2-7(Cold Box top)	-108.8	53.4	T3-7(doorknob)	91.7	86.7
T1-8(outer 67.5mm)(H-top)	11.5	117.9	T2-8(Cold Box side 1)	-59	54.9	T3-8(doorknob end plate)	77.7	72.4
T1-9(warm outer bellows middle1)	56.9	67.7	T2-9(Cold Box side2)	-67.3	68.3	T3-9(cold end plate)	7.8	2.9
T1-10(warm outer bellows middle2)	57.9	69.2	T2-10(Cold Box bottom)	-55.8	66	T3-10(room temperature)	5.9	3.9

赤: 100°Cを超える場所また100K近くを超える温度上昇の場所。内導体のベローズ部は温度が100°Cを超える。外導体で $\Delta T=100K$ を超える場所が多いが、温度は40°C以下で問題なし。

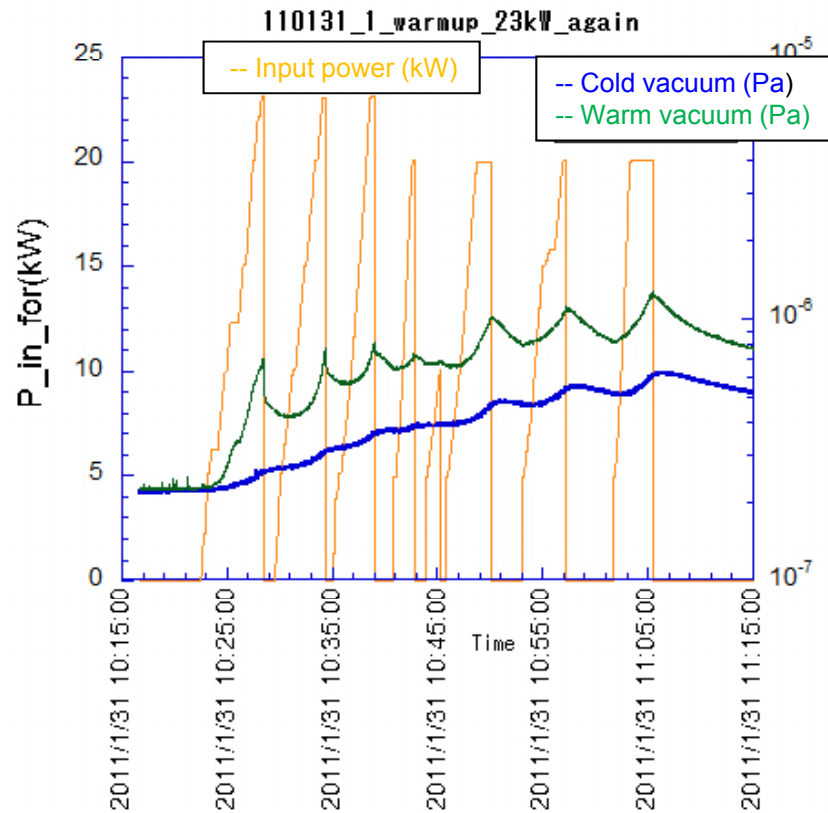


温度計 setup

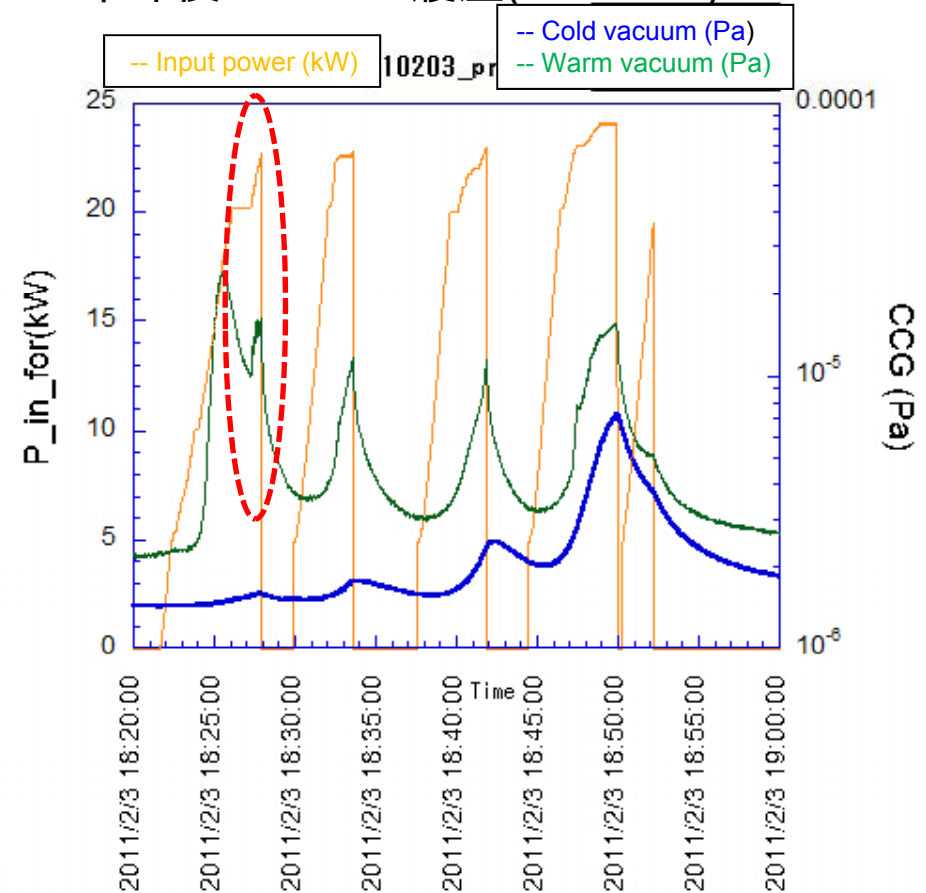
赤部分(外導体)は液体窒素にしか熱の逃げ場がない。温度上昇が大きくなる理由である。

Processの効果を見る。(昇温＋大気解放後のパワーテスト)

昇温後のパワー履歴(2011/1/31)



カプラーを大気解放後、液体窒素で冷却後のパワー履歴(2011/2/3)



昇温を行わずはパワー投入を行った(左図)。パワーはスムーズに上がっていった。最大23kWまであげた。さらに、モジュール組み込みを想定して、窒素パージの後、大気解放を4時間行った。その後、真空引きを再度行い、液体窒素冷却後、processの効果を見た。20kWまでパワーはスムーズに上がる。一度22kWでarcで落ちたが、その後は24kWまでスムーズに上がる。Processの効果あり。

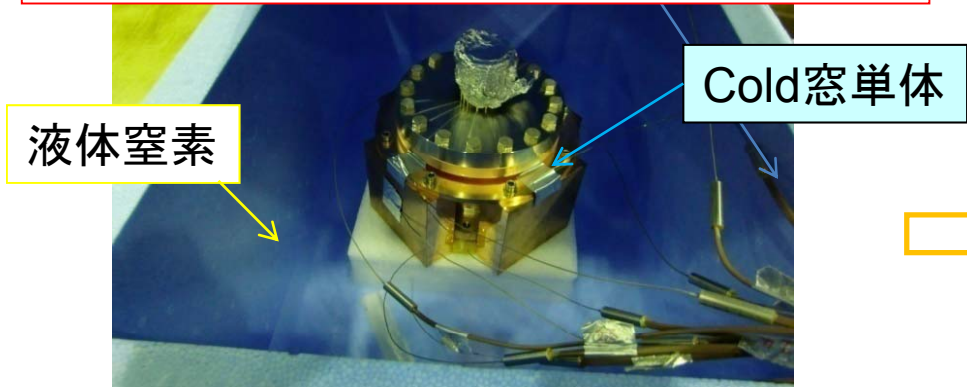
High power test Summary

- 20kW投入後にarcセンサーが働き、10kWレベルでarcセンサーが働き、electronが出るようになった。おそらくこの10kWレベルがmultipactingのレベルであると予想される。Processのため、30usのpulseを上乗せし、pulse processingを実行。8時間の後にprocessが終わり、最大25kWまでパワー投入が可能となった。
- 5kW,10kW,20kWで温度上昇を見るためのデータを取得。パワーに対し、温度上昇はリニアに変化。Cold窓で温度上昇は20kWで $\Delta T=83K$ 。温度上昇の大きい所はN2 gas 115l/minしていたが、内導体のベローズで $127^{\circ}C$ ($\Delta T=124K$)。あとはCold窓のCold窓に近いベローズ部(T1-4)で($\Delta T=117K$)、外導体Cold窓から67.5mm離れたT1-8の($\Delta T=118K$)である。これらの部分は磁場のピークがある場所で、その影響で温度が高いと思われる。
- warm側真空は $4 \times 10^{-6} Pa$ から下がる傾向あり。Cold側も $4 \times 10^{-7} Pa$ で問題なし。
- 入熱は計算との比較をつめる予定である。
- Processの効果を見るべく、昇温後、一度窒素パージ後、大気に4時間カプラーを晒し、再度真空ひき&液体窒素で冷却を行ったが、24kWまでスムーズにパワーを投入可能であった。Processの効果があったものと思われる。Leak checkではCold窓の割れはなかった。

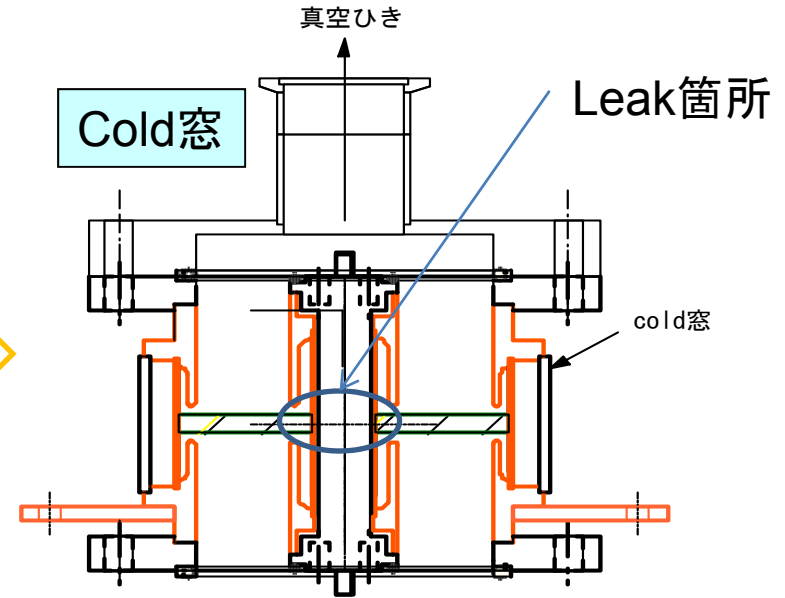
→引き続きこのsetupでCold窓の熱サイクルテストを行う。

Thermal cycle testについて復習-窓単体thermal cycle testでのCold窓の割れ (2010夏まで) --

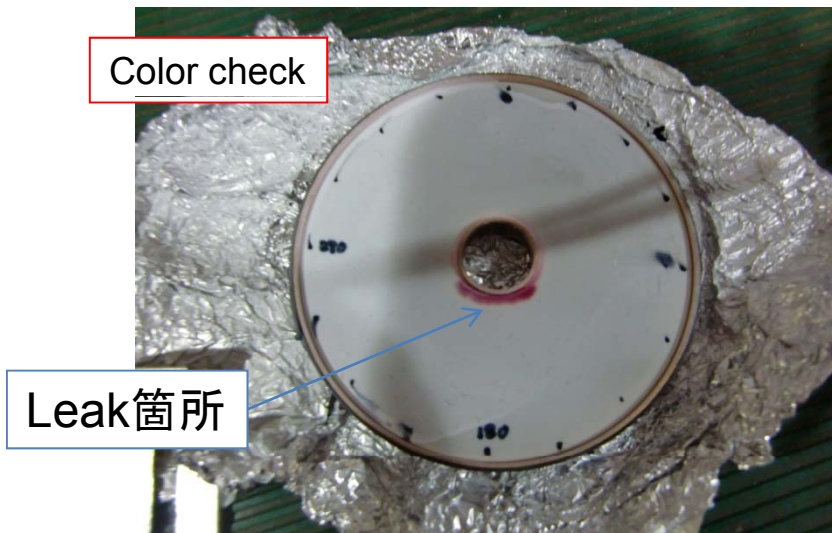
液体窒素につけて300K<->77Kの間の熱サイクルテストを行う。5-6時間かけて77Kに冷やす。



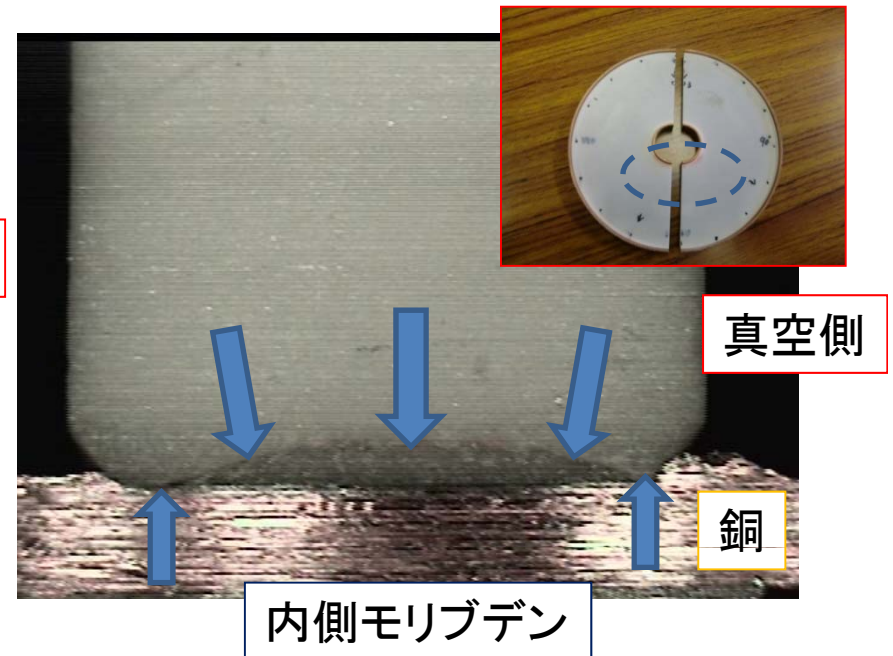
前の窓では5回の熱サイクルでLeak



Leak箇所の断面をcheckするために窓だけ切りだす。

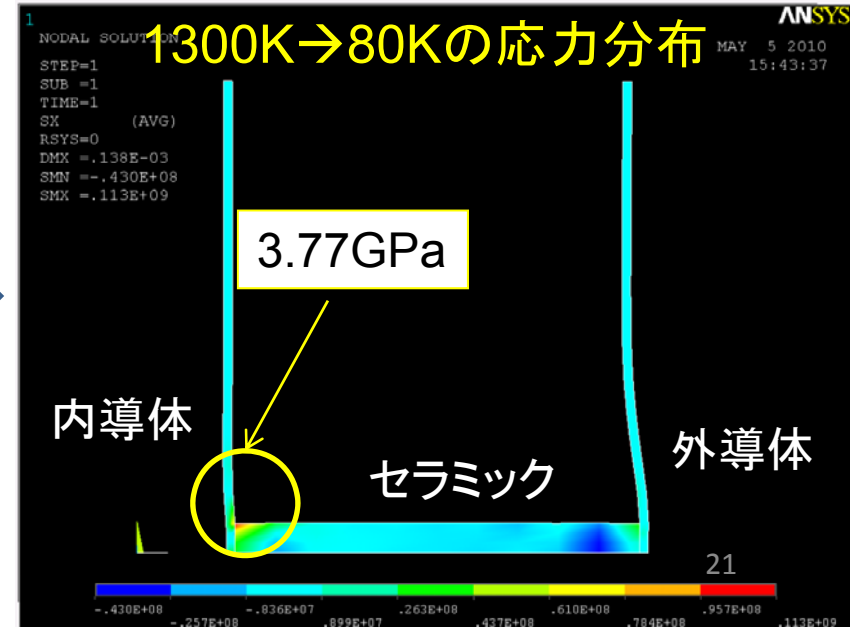
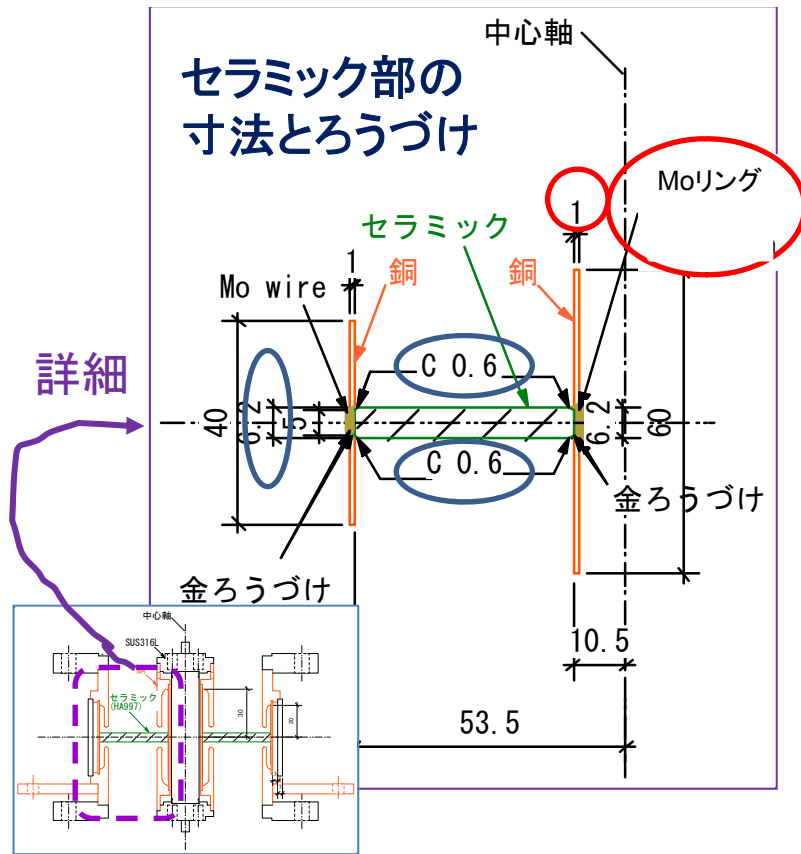


大気側



断面を詳細に見た所アーチ状の割れが見られる。改善が必要。

ANSYSによるカプラーの応力比較

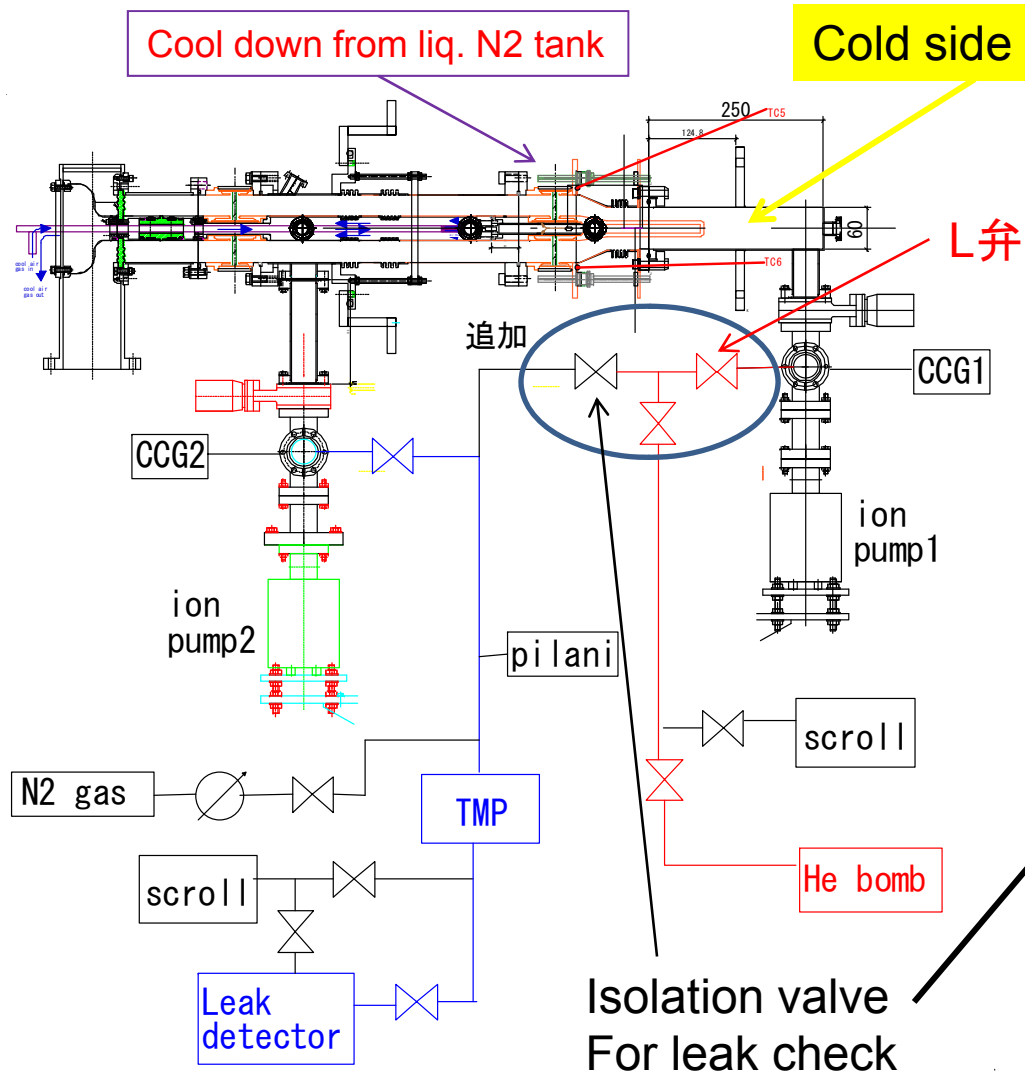


応力の最大値はセラミック内導体の接続部

Case study	セラミック窓の厚さ	Moリング厚み	銅スリーブ厚さ	最大応力 (GPa)	No1で規格化した値(%)
No.1(割れた窓)	6.2mm	100%	1.0mm	0.48507E+10	100
No.2(t=5.4mm)	5.4mm	100%	1.0mm	0.56258E+10	116.0
No.3	5.4mm	100%	1.0mm	0.45709E+10	94.2
No.4	5.4mm	200%	0.8mm	0.37652E+10	77.6

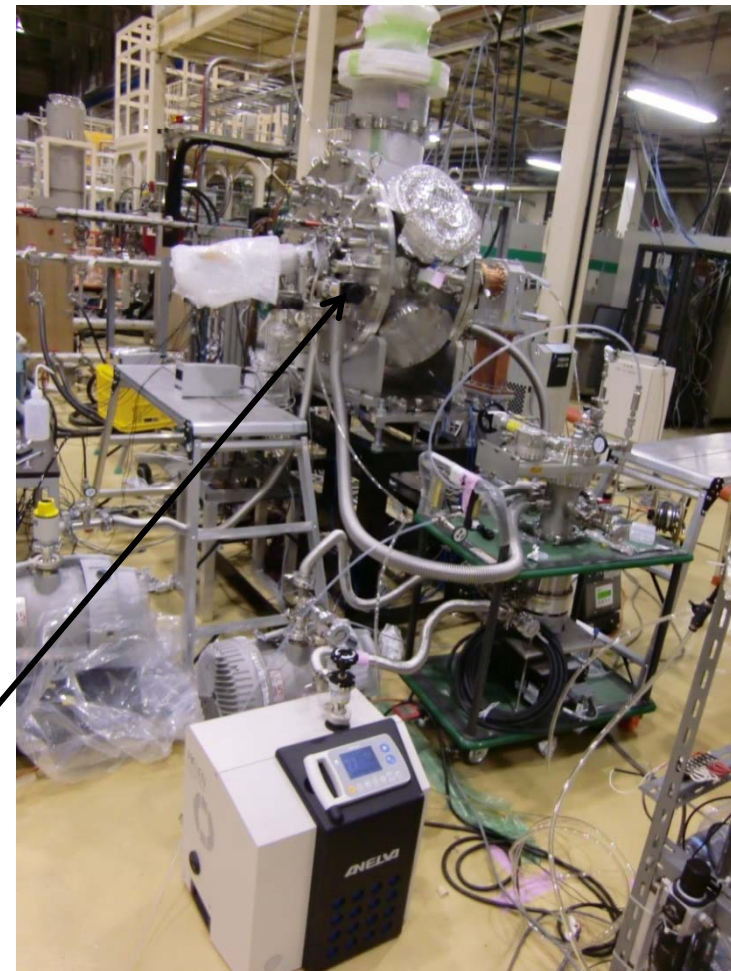
内導体の銅の厚さとMoリングの厚みを大きくして前回より応力を23%減。同パラメータ(Case4)をCoupler v1に採用。

今回のThermal cycle test setup(coupler v1のCold窓)



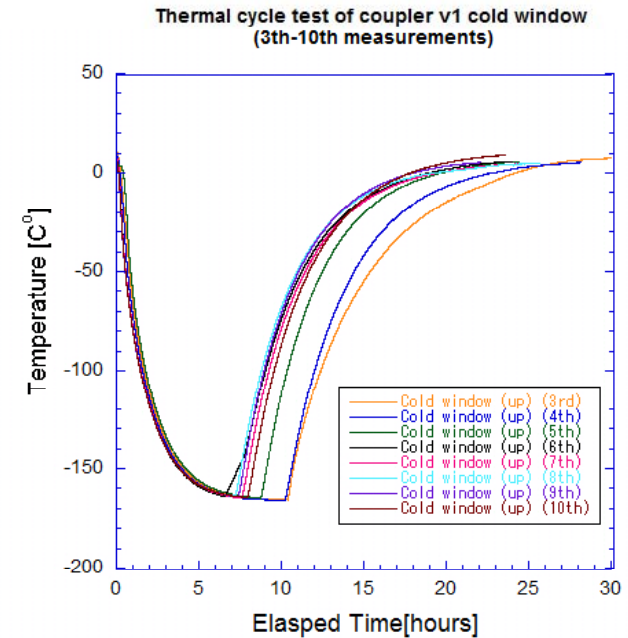
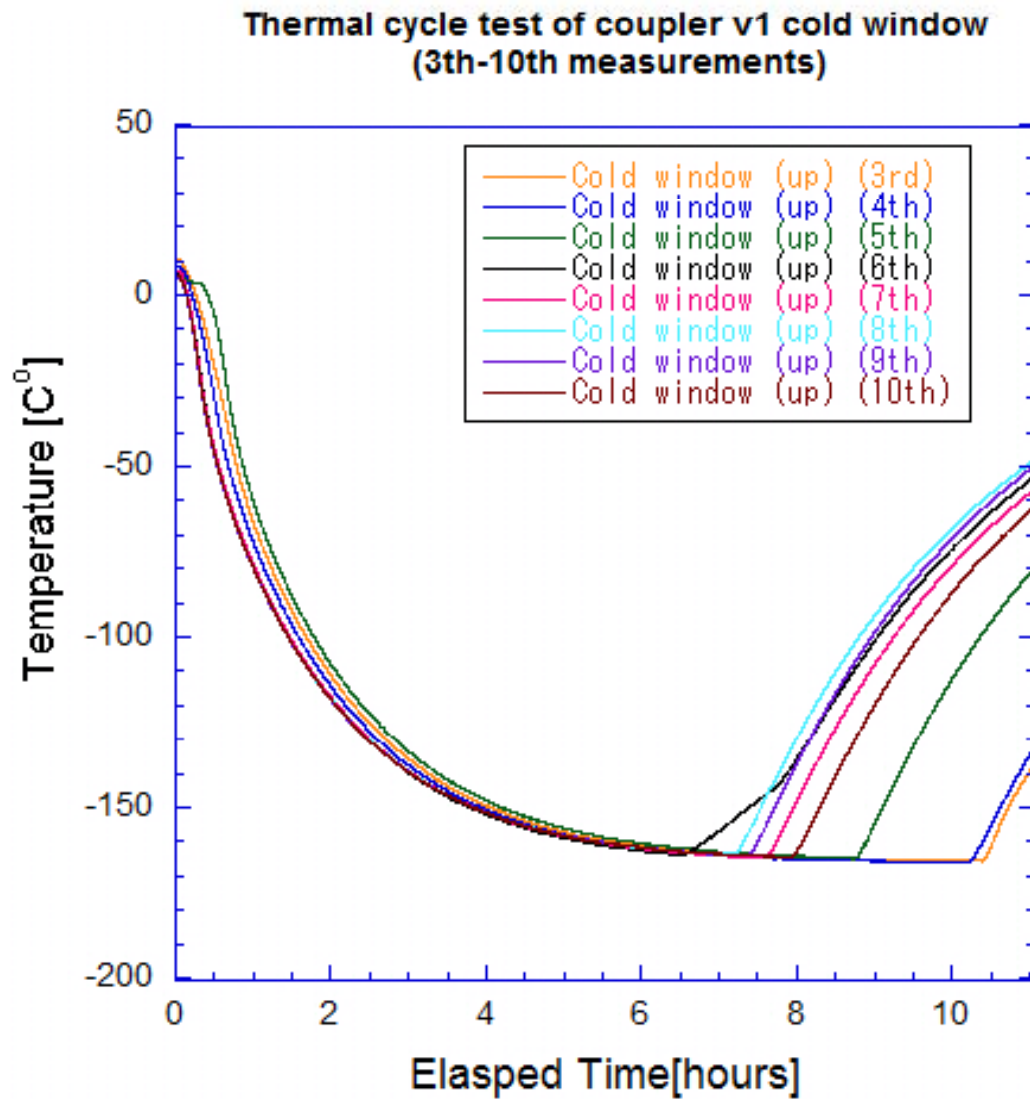
Cool down from liq. N2 tank

Cold side was filled by He.



Cold 窓は断熱槽に置いたまま窒素タンクで冷却。
Cold窓側からHeを入れてwarm窓側でleak checkを行う。

Thermal cycle test(3回目以降の温度勾配)



7時間かけて伝熱でCold窓を室温(10°C程度)から-165°Cまで冷却。最初のslopeが急であるが、実際のoperationに近いかもしれない。Warm upは液体窒素がなくなり次第、半日かけて行う。

1回目、2回目はhigh power test中の冷却+昇温過程をカウント

Leak check results

Thermal cycle (290K <-> 110K)	Old cold window (Pa m ³ /s)	New cold window (v1) (Pa m ³ /s)	Comments of new cold window
1回目	< 1.0 × 10 ⁻¹⁰ (ULVAC社 HELIOT)	N.A (ANELVA社HELEN)	L弁だけではHe内封できず。2 回目からバルブを投入。(但し、 割れたくないことは確認)
2回目	< 1.0 × 10 ⁻¹⁰	3.0 × 10 ⁻¹¹	(BG subtract)
3回目	< 1.0 × 10 ⁻¹⁰	8.2 × 10 ⁻¹⁰	(BG subtract) leak detectorの 後ろにHeが入った
4回目	< 1.0 × 10 ⁻¹⁰	2.3 × 10 ⁻¹⁰	
5回目	> 1 × 10 ⁻⁴	5.8 × 10 ⁻¹¹	
6回目		4.8 × 10 ⁻¹¹	
7回目		3.9 × 10 ⁻¹¹	
8回目		3.1 × 10 ⁻¹¹	(BG subtract)
9回目		1.0 × 10 ⁻¹¹	
10回目		7.5 × 10 ⁻¹¹	(BG subtract)

前回の窓が5回目で割れたのに対し、10回目まで割れない結果が出た。Leakなし。
これで割れなかったので、一応、Cold窓のろうづけ条件の基本設計はOKとする。

カプラー1号機実験のまとめと今後

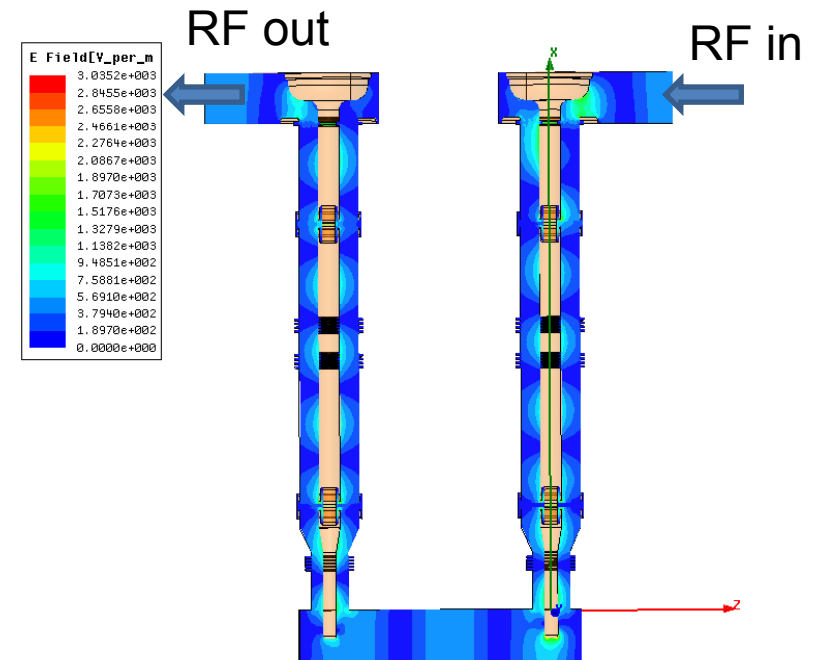
- カプラー1号機のhigh power 試験で最大定在波で25kWのパワー印加可能。
- プロセスの効果あり。
- セラミック窓の熱サイクル問題もろうづけ条件を変え、10回の熱サイクルに耐える結果となった。



・RF設計や熱設計の課題がほぼクリアされ、今年度は実機(2, 3号機)製作を行う。

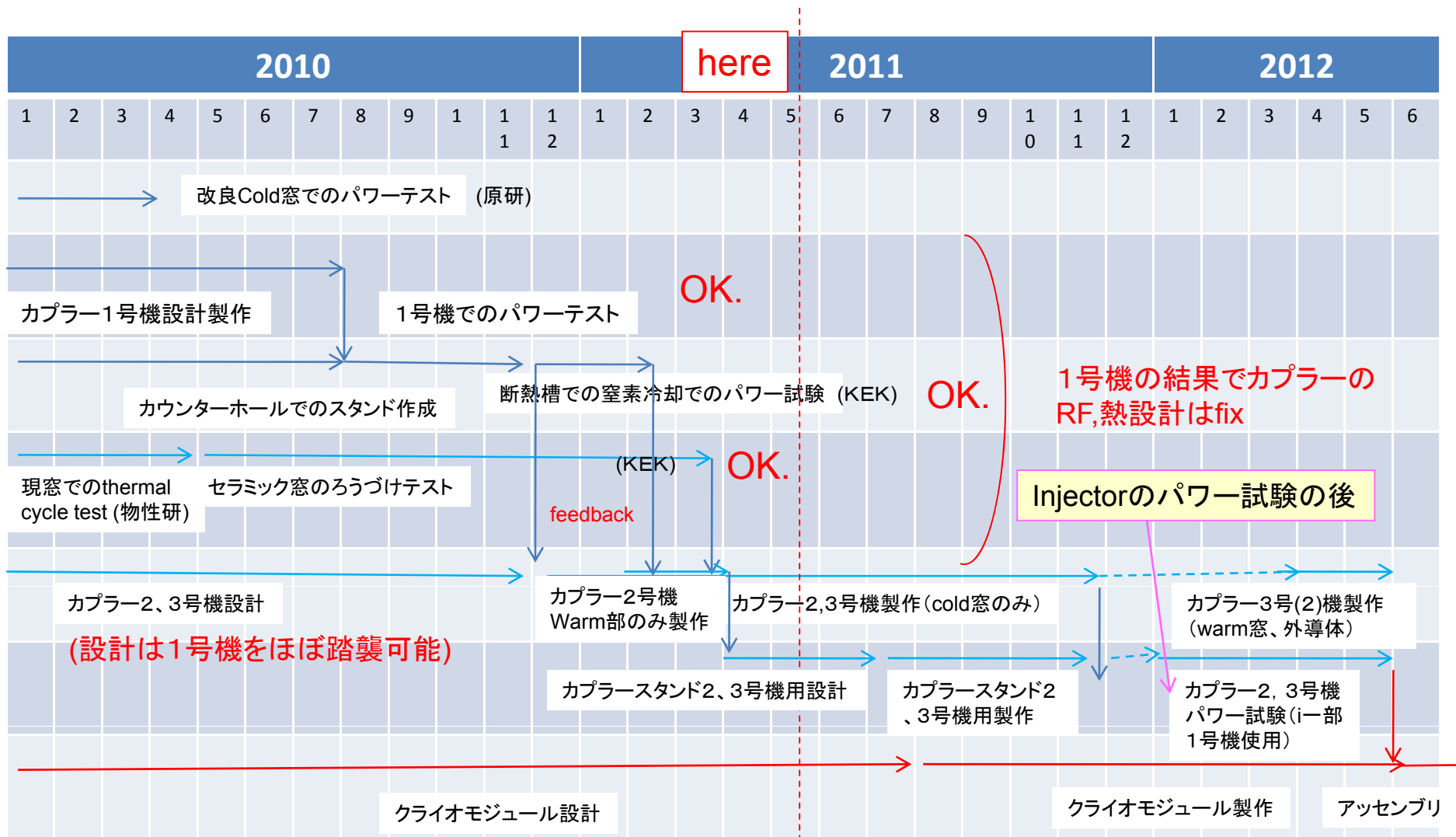
今後予定

- ・coupling 測定などのlow level測定(5月中)
 - Cold窓のアンテナの長さをfinalで決める。
- ・モジュールとの取り合いの詳細設計。
 - 組み立ての手順こみで設計。(特にCold窓)
- ・アークセンサの詳細study。
 - モジュール組込用のfiberを用いたもの。
- ・カプラー2、3号機用のtest standの設計製作
 - 今回はprocessがメイン。80kW (1/4 duty) の進行波(20kW定在波相当)でカプラー全面のprocessingを行う。このテストはinjector用の1.3GHz CW 300kW klystronを用いて行う。(カプラーテストはinjector Grp.のカプラーテストが終わった後を予定。)



2, 3号機用のカプラーテストスタンド設計図

今後の方針(最短スケジュール)



今年度(2011年度)の大きな方針

- ・モジュール設計がメイン。カプラーをモジュールにどう組み立てていくか？(詳細設計)
- ・2号機、3号機用カプラーテストスタンドの製作。(processがメイン。)

謝辞

カプラー1号機テスト無事終了しました。今まで通じて以下の方々に御礼申し上げます。

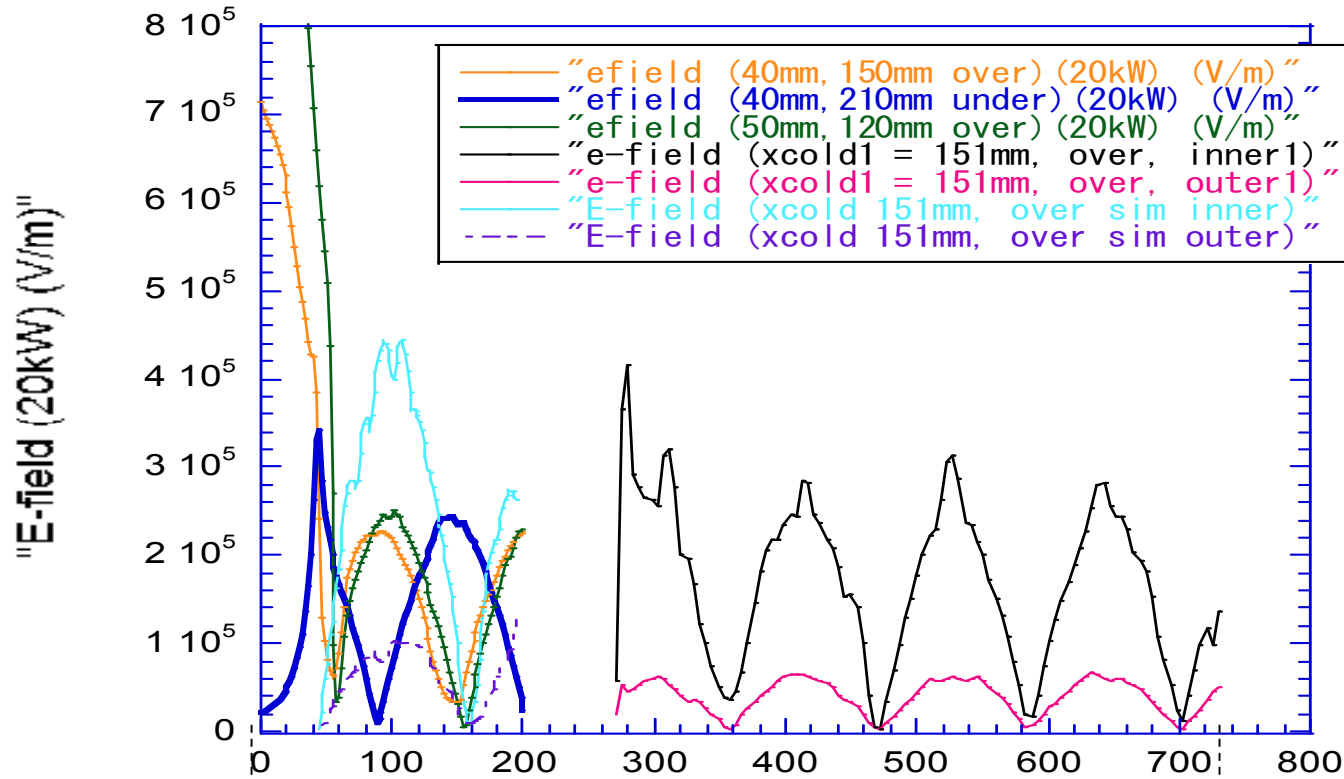
- カプラー設計製作に関して
 - 物性研の皆さま。特に中村様、石井様(元物性研)
 - KEK。野口様、加古様。
 - Cornell大。S.Belomestnykh様(現BNL)、V.Veshchereich様
- 原研でのカプラーテストスタンドにて
 - 原研の皆さま。羽島様、永井様、西森様、大内伸夫様
 - KEK。海老原様
- カプラー低温テスト、thermal cycle testに関して
 - 断熱槽設計: KEK(工作)東保男様
 - 低温試験: 物性研。尾上様
 - リーク&探傷試験: KEK、(工作)舟橋様、小林様、(低温)原様、(STF)佐藤様
- 東カウンターホールテストスタンドに関して
 - (ERL) RF Grp.の皆さま。特に三浦様、福田様、道園様、中島様、荒川様、竹中様、吉田様、矢野様。
 - (ERL) 低温Grp.の皆さま。特に小島様。
 - 液体窒素シフト: KEK。本田洋介様、山本将博様、高橋毅様
 - 東カウンターホール関係: PFの皆さま。特に浅岡様、坂中様、小林幸則様。
- その他、全般
 - 携わって頂いた多くの企業の方々。他ERL関係者の皆さま。

この実験は、大学連携事業、および量子ビームのサポートにて行われました。感謝致します。

Back up slide

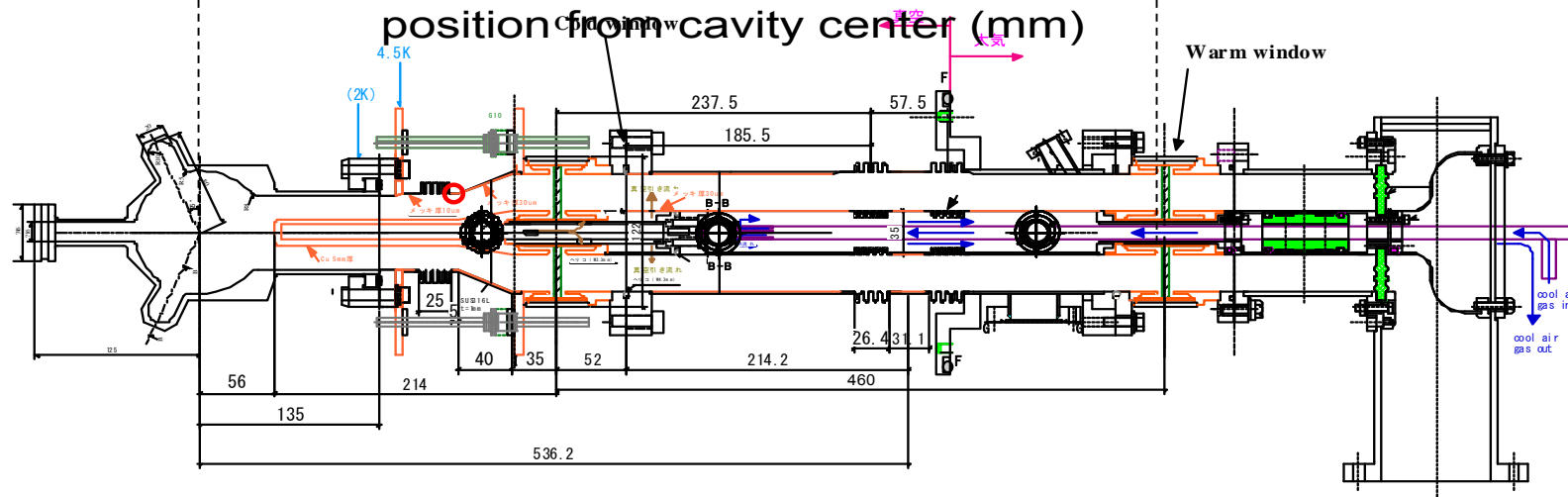
Standingの位置(HFSS Simulation overを仮定)(再確認)

SBP_LBP_input5_modif2_40mm_under_over_20kw



ベローズの位置は電場、磁場のslopeの位置に持ってきた。Warmのベローズ間はoperation時には電場がmaxつまり磁場がミニマムになる位置にきている。

今回の測定ではunderでの測定となり、warmのbellows間は磁場がmaxとなる。(発熱が大きい)



Interlock logic(power+温度+真空+流量)

IOT関係
冷却水

From
方向性結合器

RF discri
(中に検波器がある)

Local 制御ラック

RF interlock

MPS module

IOT

200W
AMP

Pin_for

Level 調整

Pin_ref

Level 調整

TTL(HIGH 異常)

Level反転

TTL(LOW異常)

温度

WE900

温度上限設定
はソフトで行う。

TTL(HIGH 異常)

TTL(HIGH 異常)

TTL
(LOW 異常)

RF
Switch
(TTL low
open)

Arc sensor 1

Arc interlock
module

Arc sensor 2

CCG 1

CCG 2

interlock
module

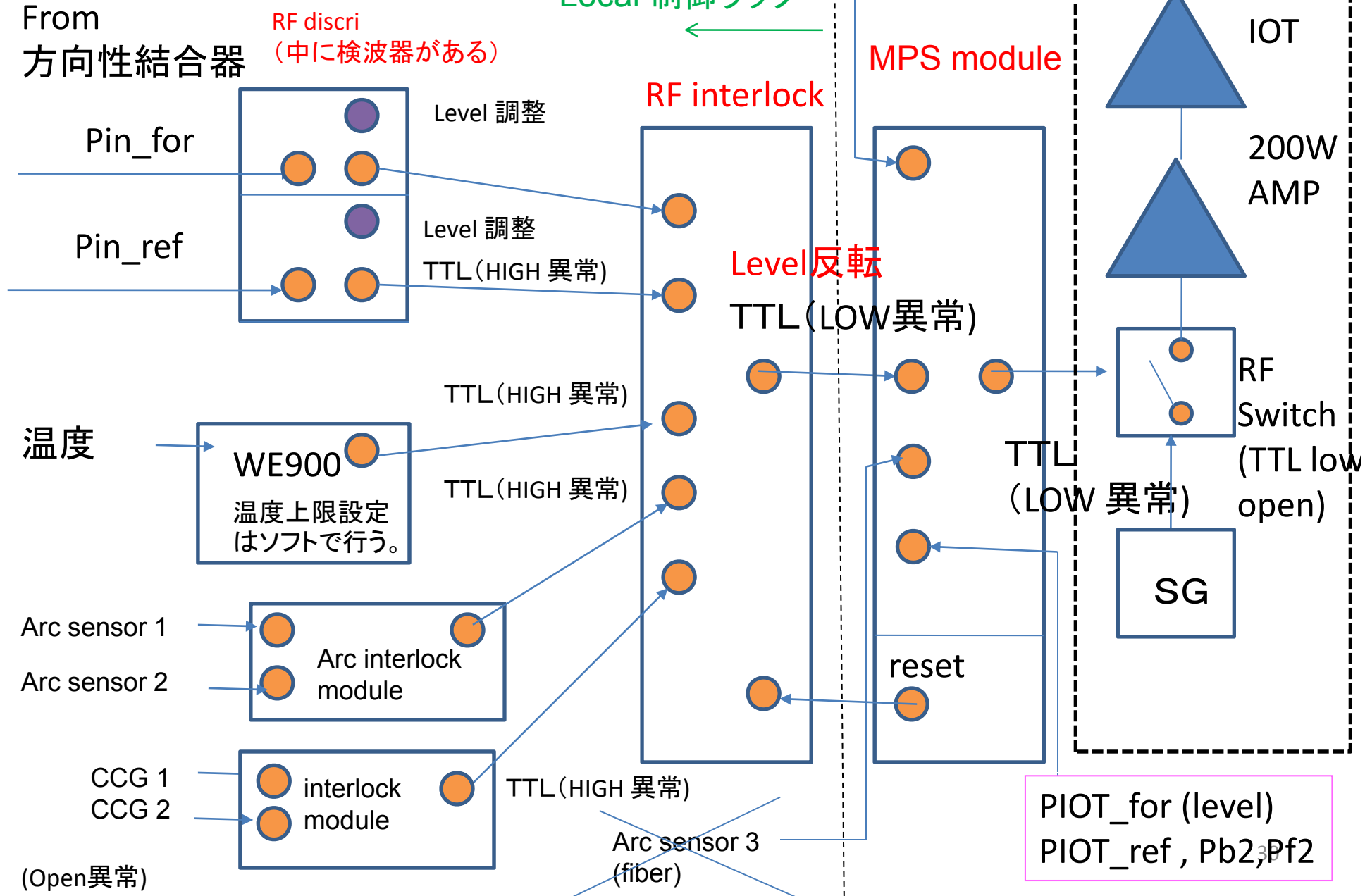
TTL(HIGH 異常)

reset

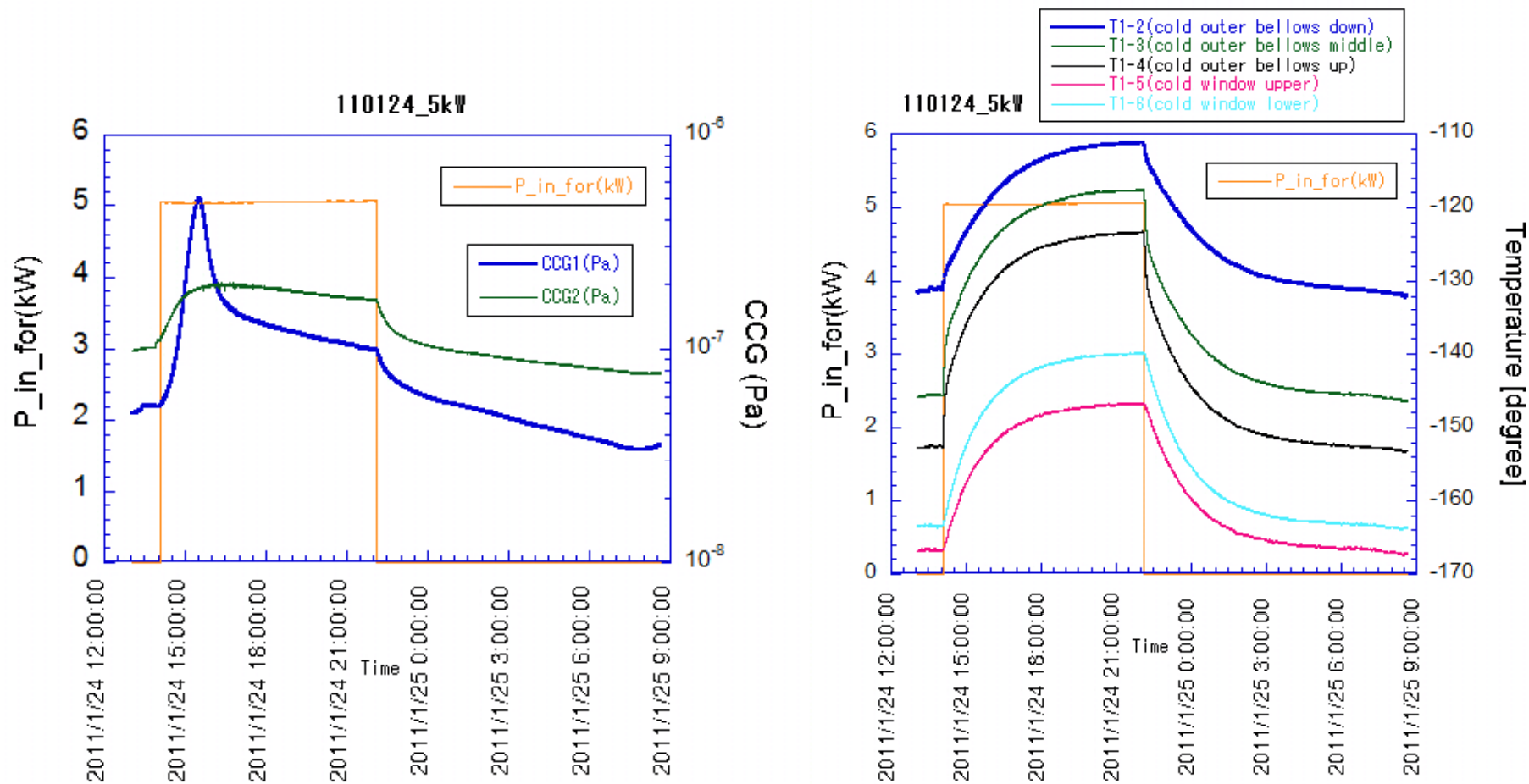
(Open異常)

Arc sensor 3
(fiber)

PIOT_for (level)
PIOT_ref , Pb2,Pf2



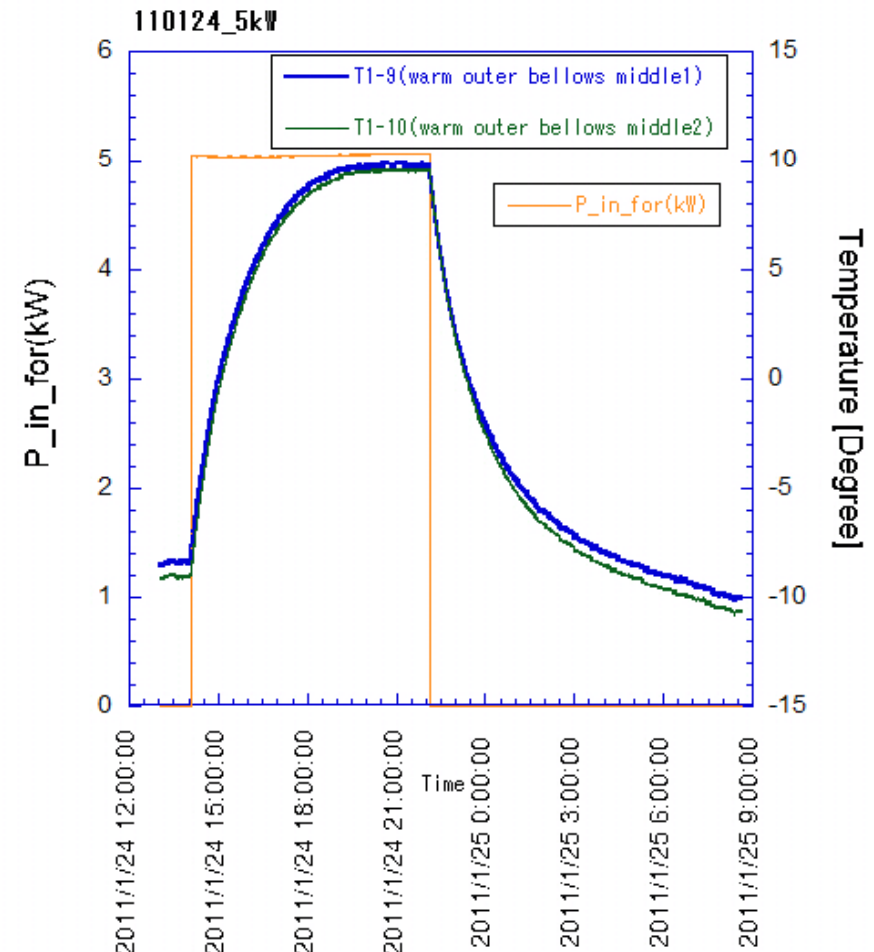
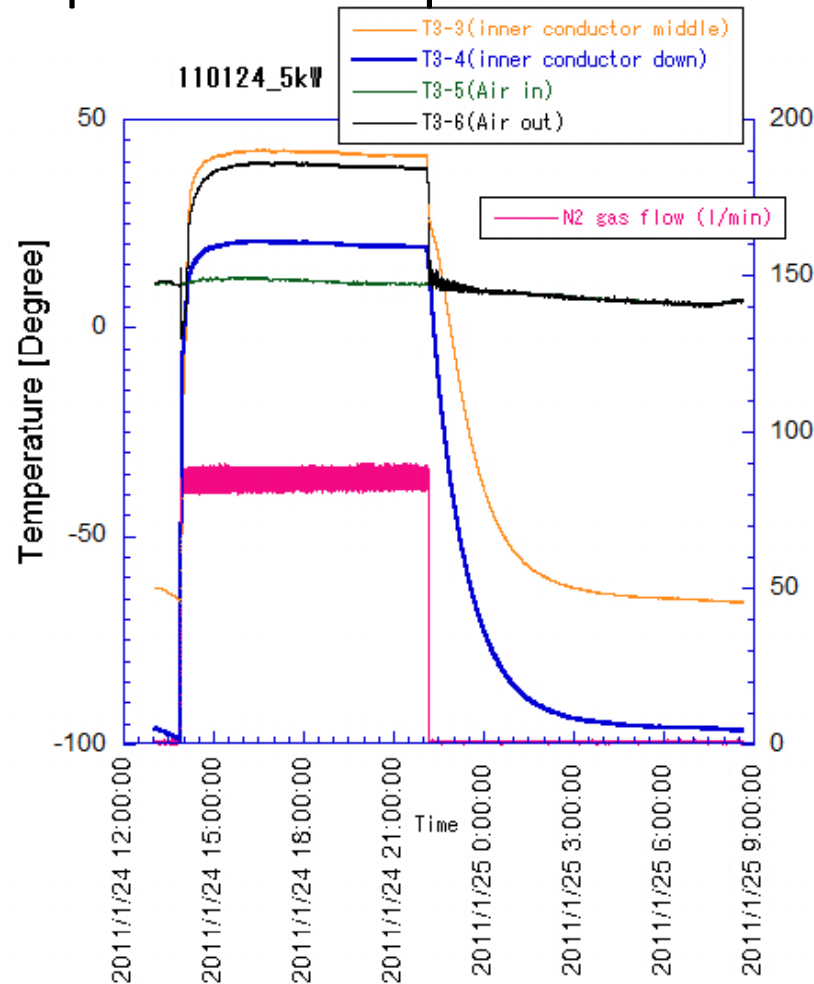
Typical 5kW keep data (2011/1/24) power vs vac & Temperature of Cold window



5kWまでは順調にパワーが入る。真空はCold側(CCG1)が 5×10^{-7} Paまであがるが、相対的に真空は低いレベルで安定。Cold窓の温度は5kWで20°Cの温度上昇。Cold側のベローズも最大で29°C(Ch4)の温度上昇で安定した。7時間安定にkeepした。

Typical 5kW keep data (2011/1/24)

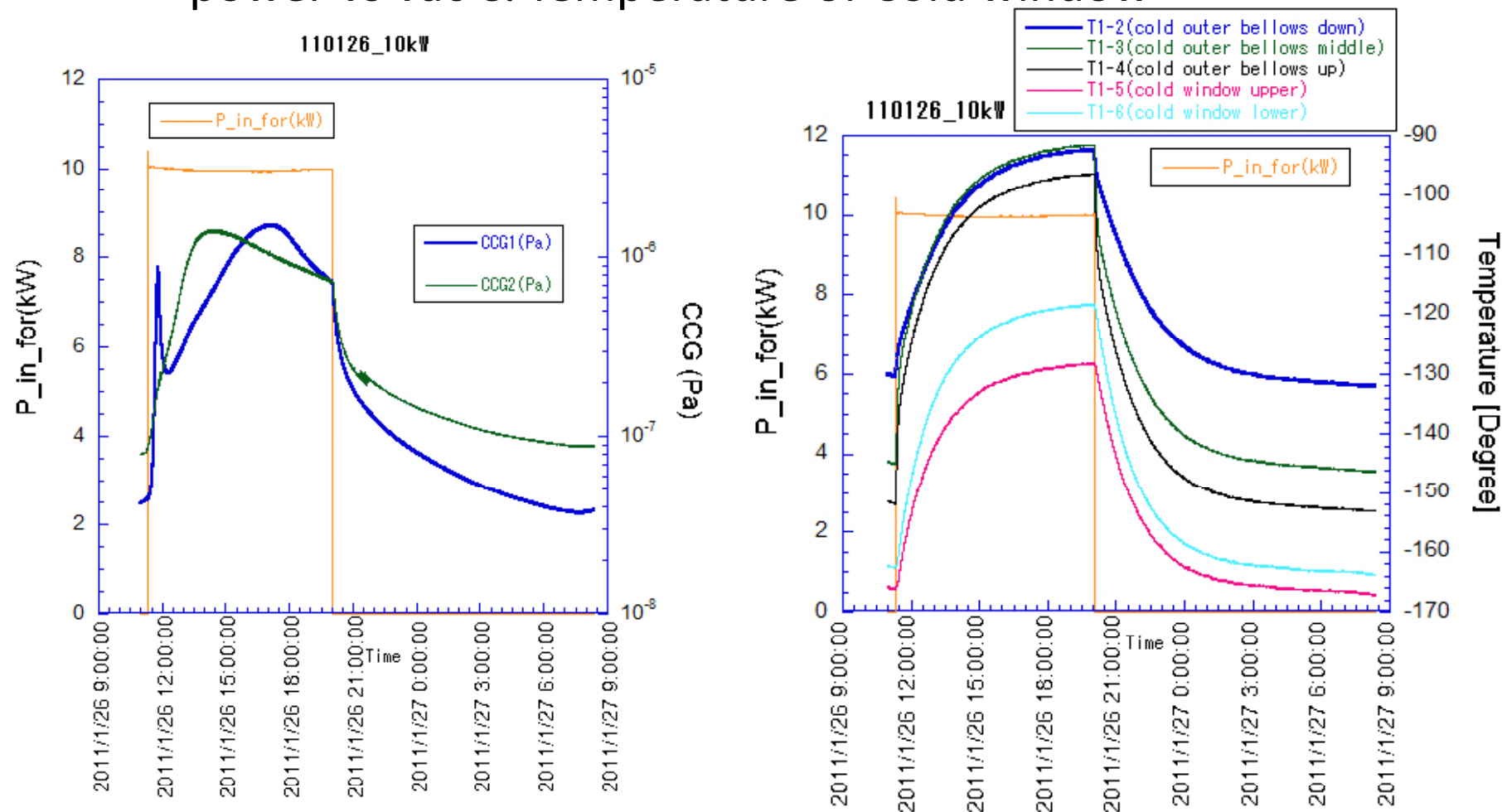
power vs Temperature of inner and outer bellows at warm part



N2 flow of inner conductor : 88 l/min

内導体へのN2 gasの流量は一定。内導体のbellowsのまん中(T3-3)が一番温度上昇が高く、38°Cの温度上昇。N2 gas out(T3-6)もほぼ同じ温度。内導体ベローズのCold寄りの部分(T3-4)は液体窒素冷却で常温テストよりも温度上昇が低い。外導体のベローズの温度上昇は18°Cで断熱槽を用いた常温テストのときとほぼ同じであった。

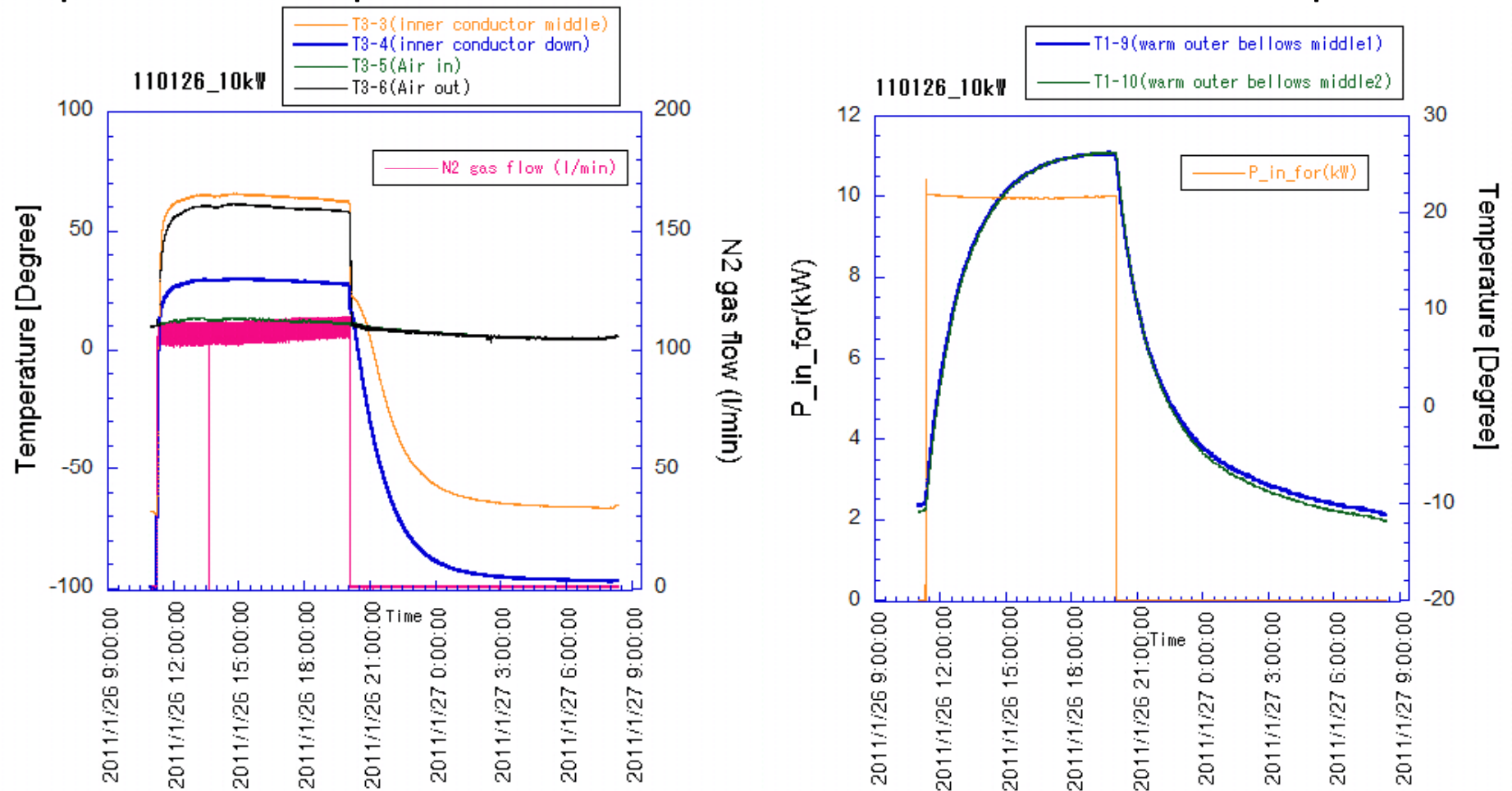
Typical 10kW keep data (2011/1/26) power vs vac & Temperature of Cold window



10kWまでは順調にパワーが入る。真空はCold側(CCG1)前回と同じく一瞬であがった後、真空は最大 2×10^{-6} Pa程度まで上がる。Warm側の真空も同じ。但し温度が安定後は真空は下がる。Cold窓の温度は10kWで $38^{\circ}C$ の温度上昇。Cold側のベローズも最大 $55^{\circ}C$ (Ch4)の温度上昇で安定。温度上昇は5kWに対して、ほぼリニア。7時間安定にkeepした。

Typical 10kW keep data (2011/1/26)

power vs Temperature of inner and outer bellows at warm part



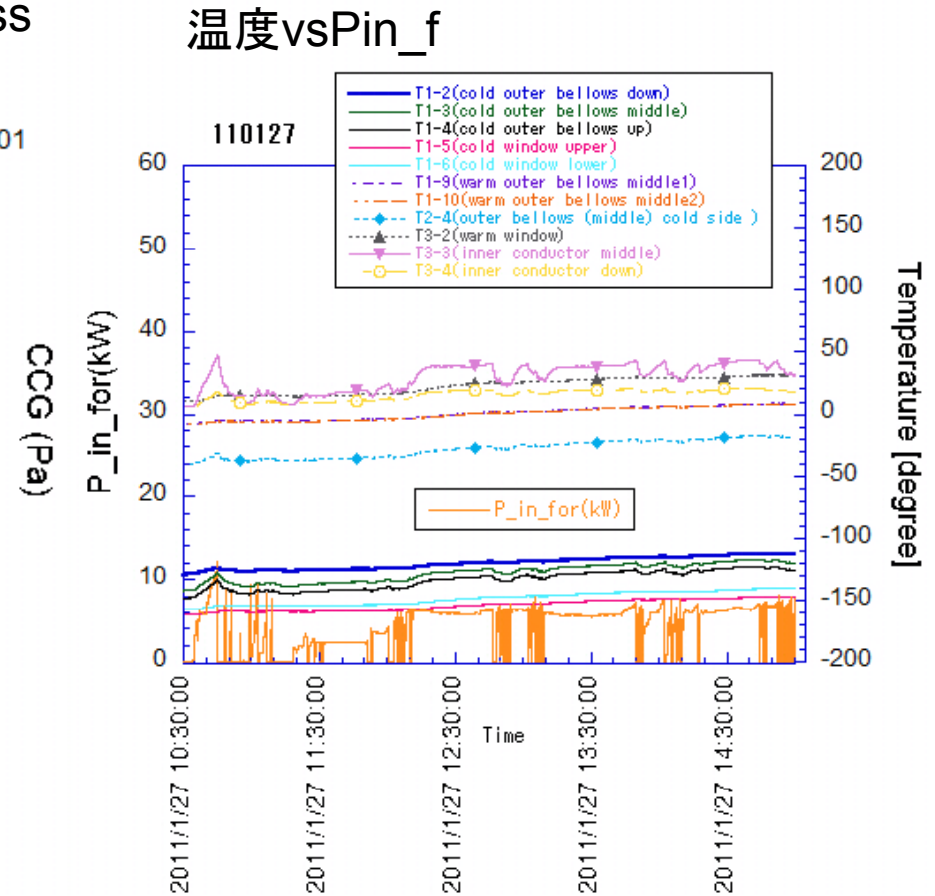
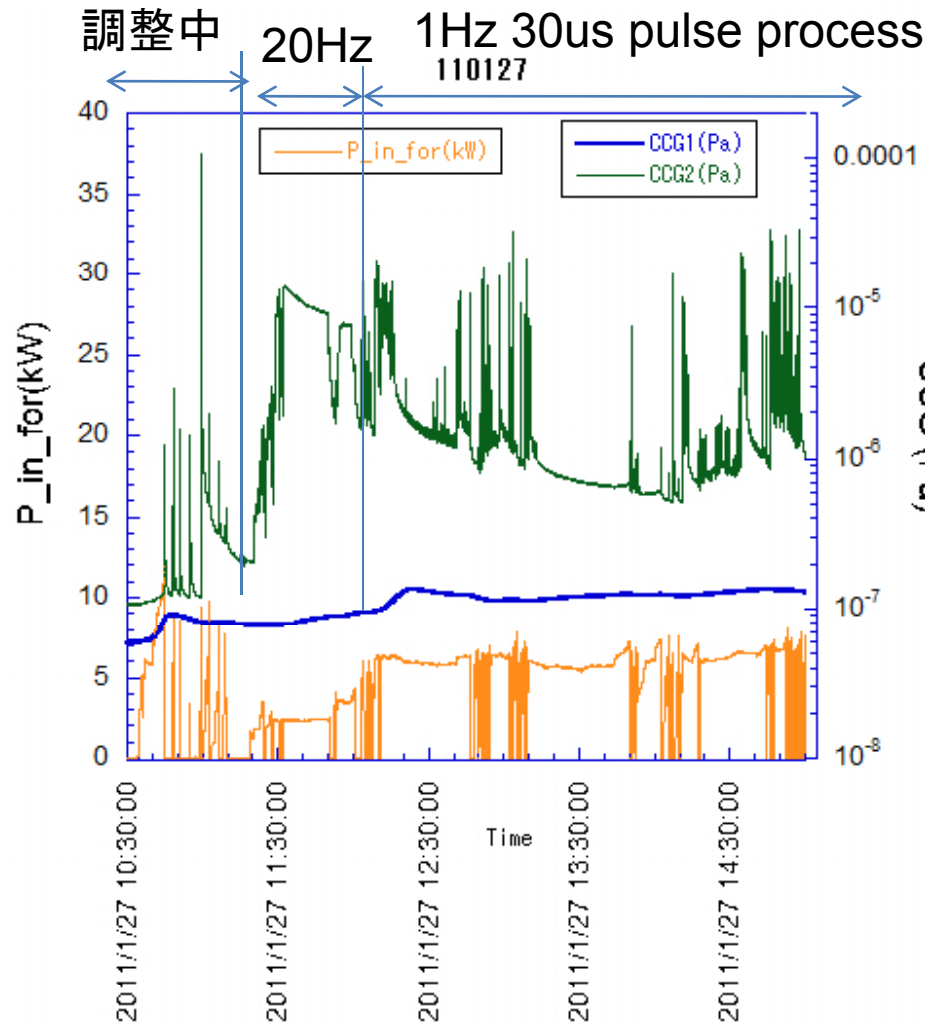
N2 flow of inner conductor : 114 l/min

内導体へのN2 gasの流量は一定。内導体のbellowsのまん中(T3-3)が一番温度上昇が高く、59°Cの温度上昇。N2 gas out(T3-6)もほぼ同じ温度。外導体のベローズの温度上昇は36°Cで断熱槽を用いた常温テストのときとほぼ同じであった。温度上昇は5kWに対し、リニア。

Processing history (2011/1/27)

Time	Study items	備考
9:08	Power on	
9:13	Power reached 20kW & arc interlock (warm)	E-pick 3 : 690mV
-10:00	Many arc interlock around 10kW level	E-pick worked & CCG2 increased up to $1 \cdot 10^{-6}$ Pa
10:30-	Change pulse processing by FG without ALC. Pulse height and offset were changed for processing.	Duty: 1Hz , pulse width 10us
11:30-	Change duty increased 20Hz : V:1.309V → 1.969V and amplitude 360mV, CCG2 : $1.5 \cdot 10^{-5}$ Pa , 5kW level	Measured pulse width : 30us
12:00-	Change duty to 1Hz & continue increasing power.	Many time arc interlock worked & processed.
13:16-	Vac. was stabilized to $9 \cdot 10^{-7}$ Pa.	
16:23	Big arc interlock : e-pick 1V	Arc 2
-17:48	Continue pulse processing & increase power	
17:50	Change CW mode without ALC	
18:40	Vac 1 (Cold) interlock & vac1 fluctuated	Interlock $1 \cdot 10^{-4}$ Pa
18:50	Reached 25kW & keep this level	Keep 1 hours
20:03	RF off	35

Pulse Processing 10:30-15:00 (2011/1/27)

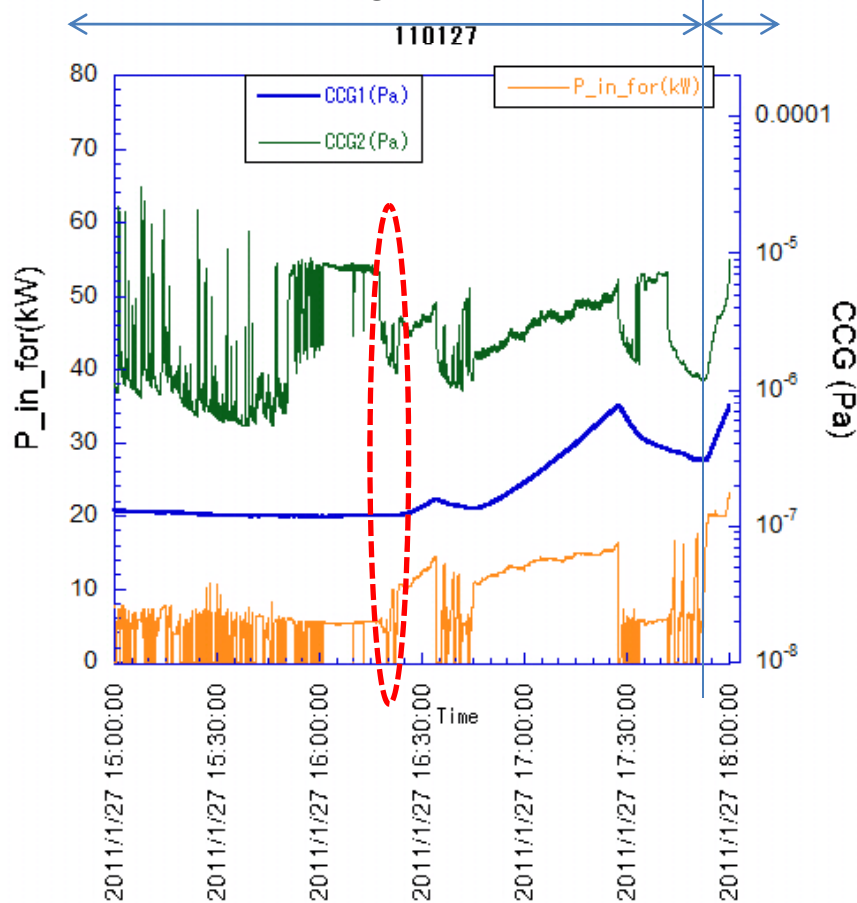


Process中ベローズなどに大きな温度上昇はない

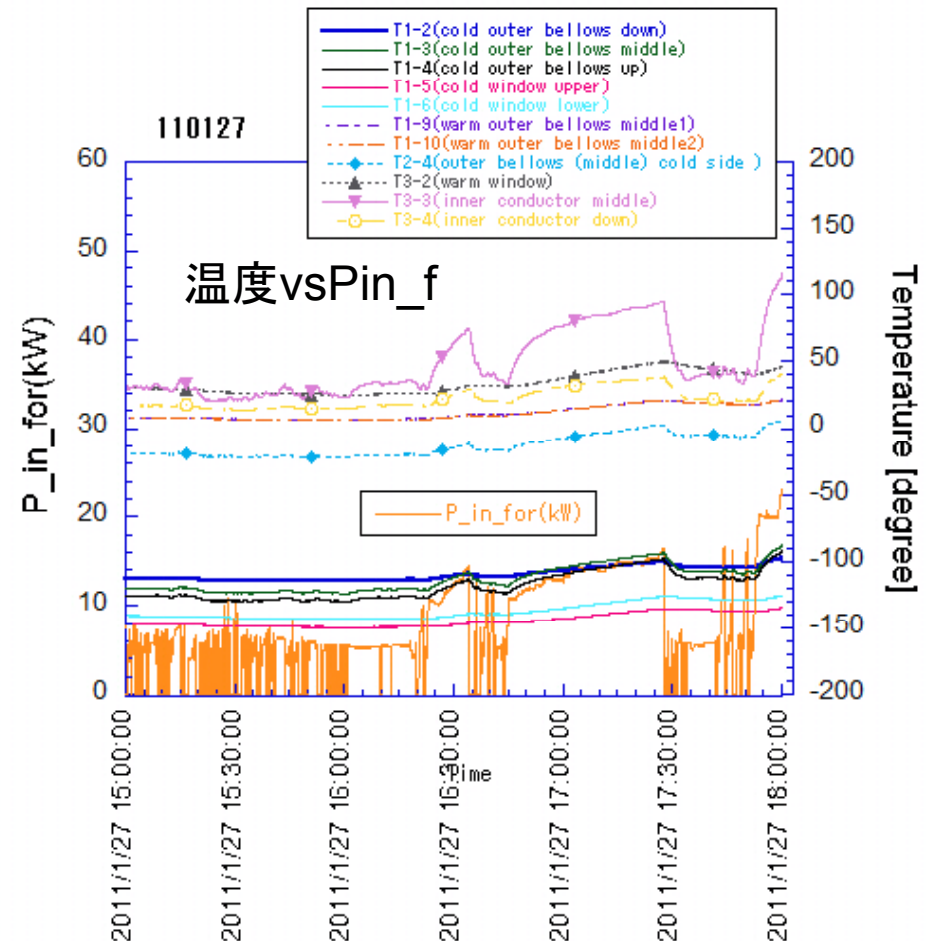
Pulse processing前半。最初は色々調整をしながら、ある程度pulseに合わせ、electronが出るが、arcなどのinterlockがかからない状態に合わせ、その後、dutyを上げ、真空が上がっていく様子を見ながら、processを進めていく。右図にあるように11:30くらいからdutyを20Hzにしてprocessをすすめ、真空レベルを下げていくと同時にパワーを上げていく。13:00頃にはprocessも進み、真空がある程度落ち着いた。温度上昇は内導体ベローズで30-40°C程度。

Processing 15:00-18:00 (2011/1/27)

Pulse processing CW

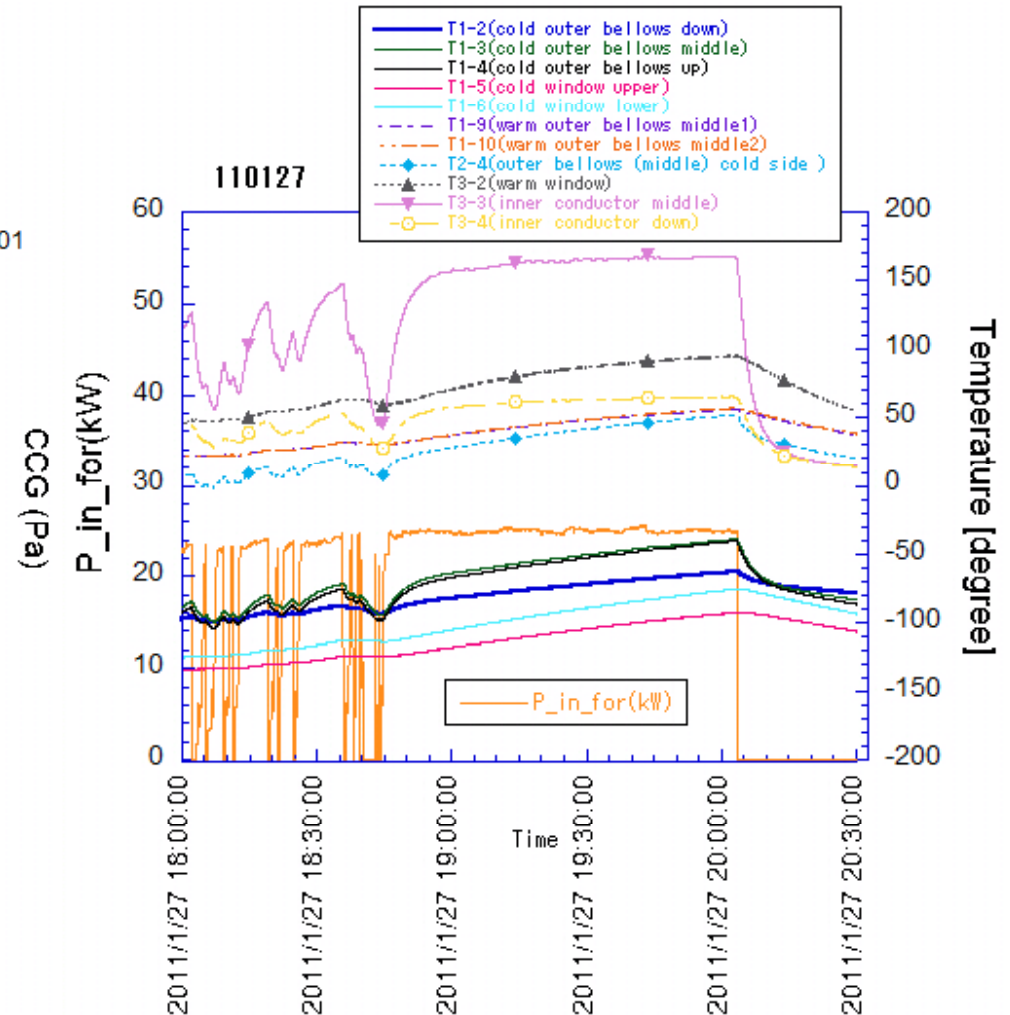
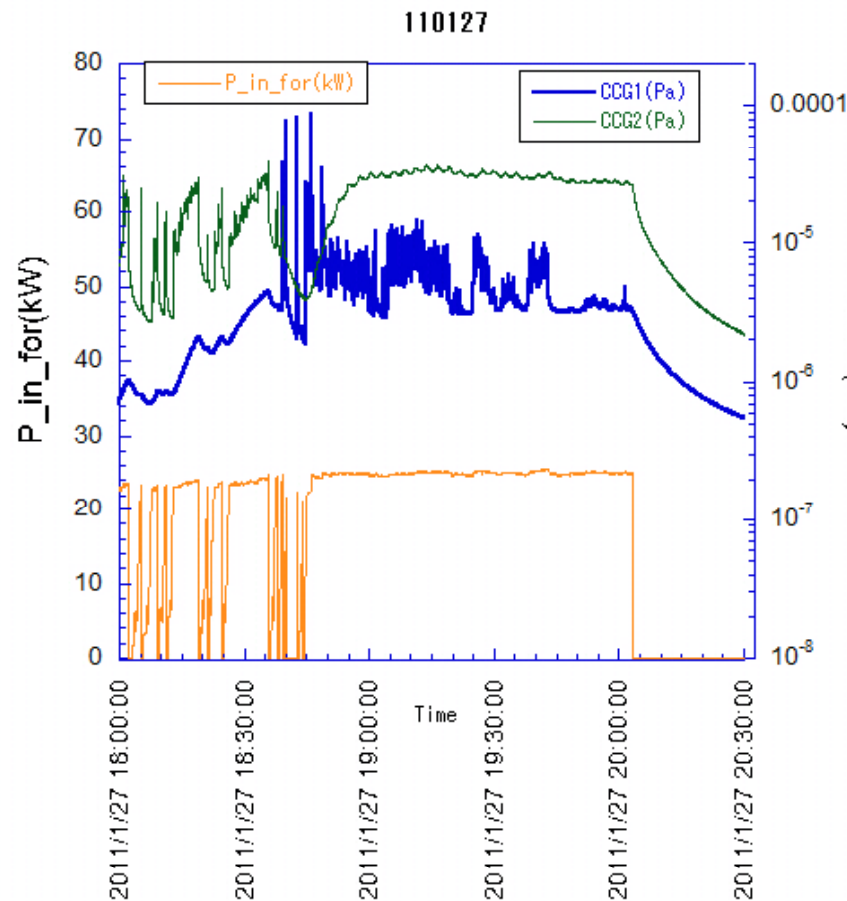


Process中ベローズなどに大きな温度上昇はない



Process中の後半のデータ。Pulse processを継続していたが、16:23に1V程度のe-pick出力が出てきた後に、powerがsmoothに上がるようになる。17:30頃に一旦パワーレベルが下がるが、さらにprocess後にパワーがsmoothにあがる。このころから反射interlock(RF Grp側が用意したinterlock module)で落ちることが多くなり、17:50にpulse processをやめ、CWでpower投入再開。但し、いつでもpulse modeに変えられるようにALCは通さずに、あくまでFGのoffsetを上げていだけでCWでパワー投入した。17:53でようやく20kWに到達。

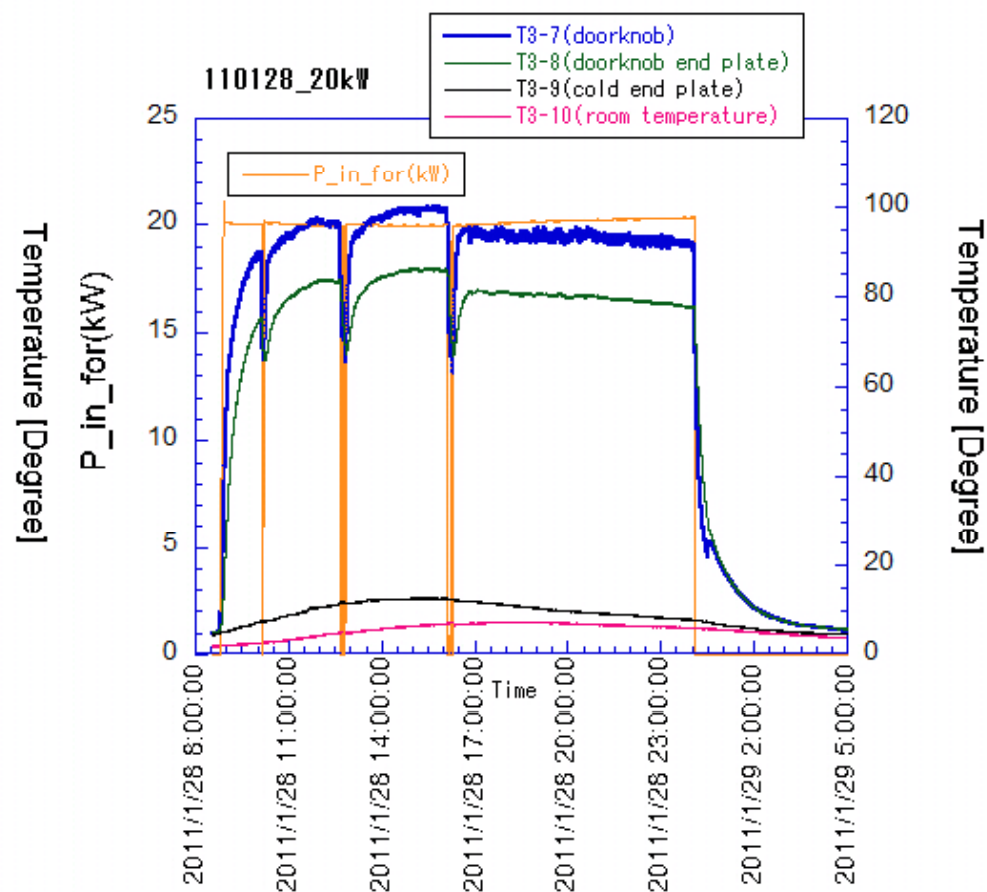
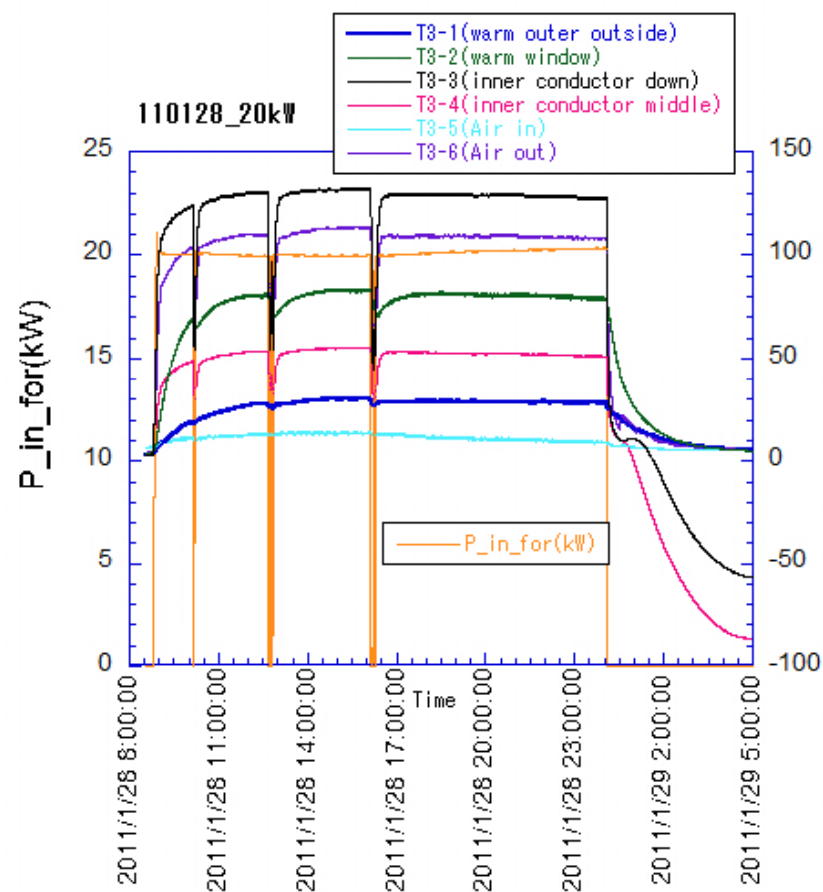
CW up to 25kW 18:00-20:30 (2011/1/27)



CWでパワー投入後、**25kWに到達**。その前からCCG1で真空が活動的になる。ある程度25kWでパワーをkeepしていくうちに真空が下がっていく様子がみられた。右図は温度上昇の図であるが、N2 gasを110l/min内導体にかけているにも関わらず、内導体のベローズのmiddleは170°Cを示していた。それ以外ではwarm窓が100°C近くに上昇。内導体の温度が安定してからCCG2の真空は徐々に良くなっていくのがわかる。他の温度はまだ上昇中。

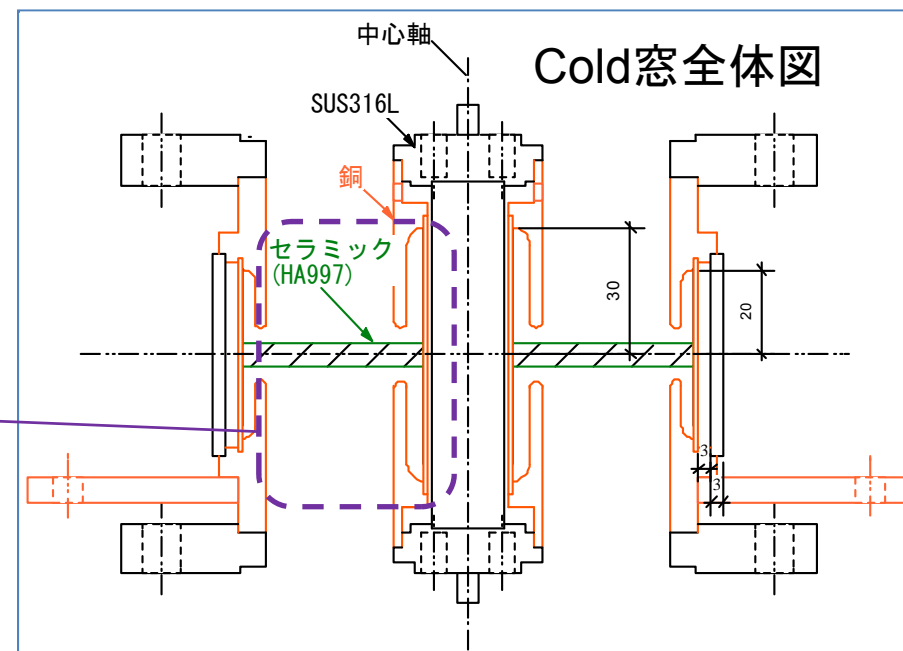
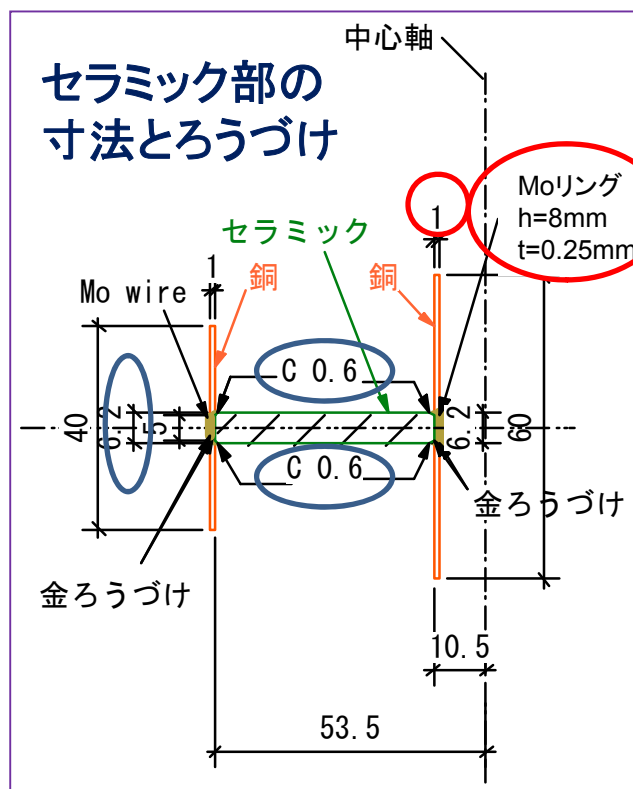
20kW keep data (2011/1/28)

power vs Temperature of inner conductor & warm window & others



左は内導体の温度上昇の様子。内導体のベローズのまん中が温度上昇が高く、N2 gasの流量が116l/minで温度は130°Cまであがる。Warm窓の温度上昇は $\Delta T=75K$ 。ドアノブ本体の温度が92°Cまであがる。ドアノブ端板の温度は75°C。周りの温度に左右されるので、夏場などは空冷が必要ならあてる予定。

Coldセラミック窓詳細図 (coupler v1の設計値)



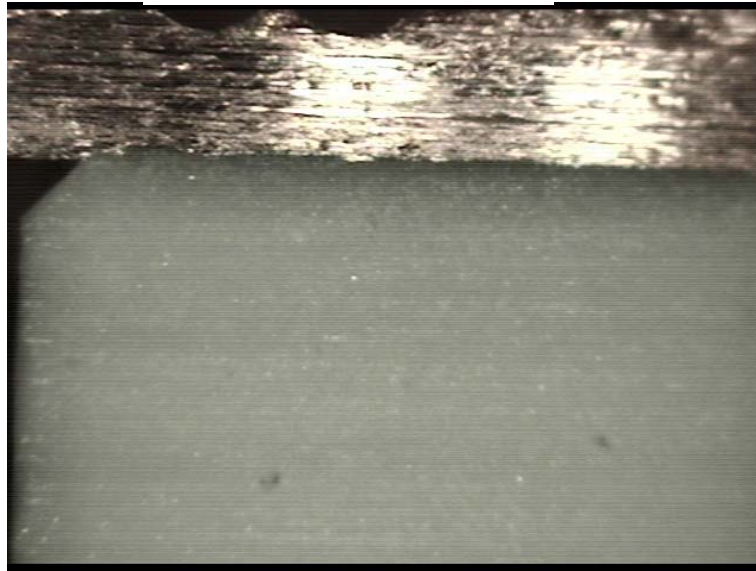
STFBIとの違い: セラミック窓 HA997
内導体choke長さ 20mm→30mm
内外の半径。

変更点	Old Cold window	New Cold window (coupler v1)
セラミック(HA997)厚み	6.2mm	5.4mm
セラミックC面	0.6mm	0.2mm
内導体のCu厚み	1mm	0.8mm
内導体Moリング厚み	0.25mm	0.5mm

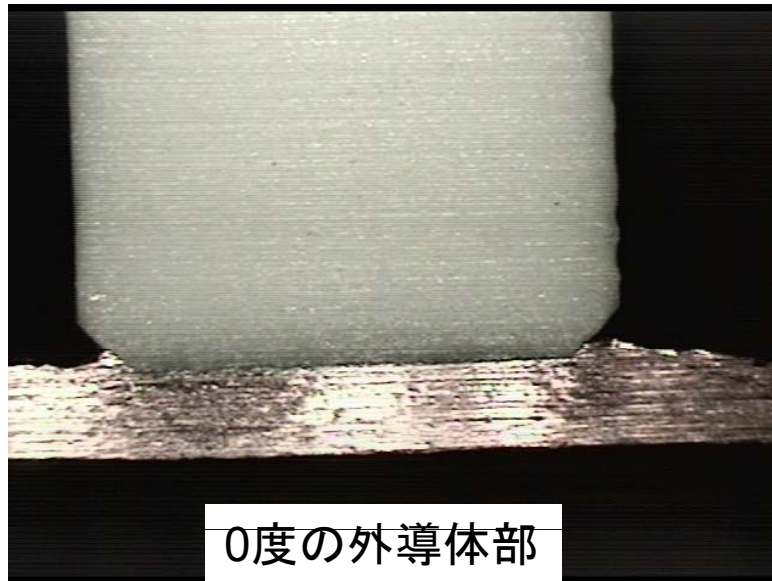
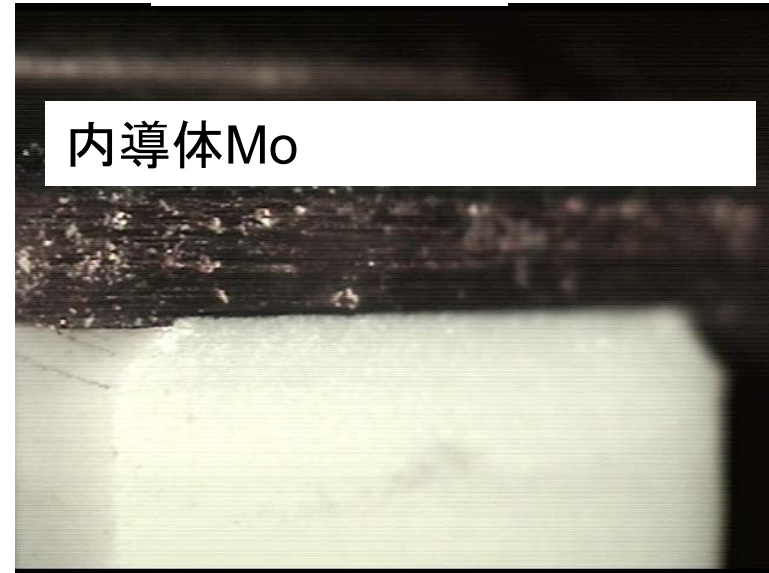
篠江さんの計算からCuを薄く、なおかつMoを厚くする設計を1号機のCold窓に盛り込んだ。

90度側のセラミックの断面詳細

180度の外導体部

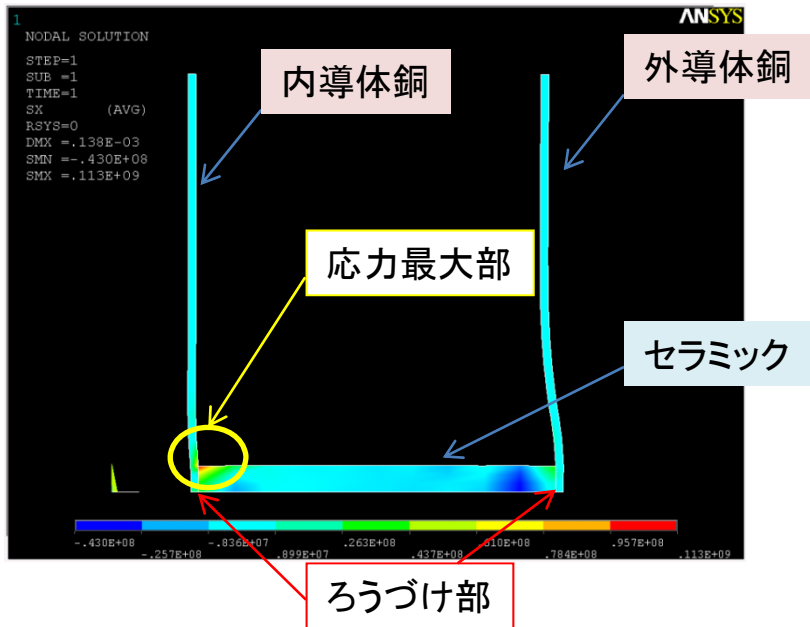


0度の内導体部



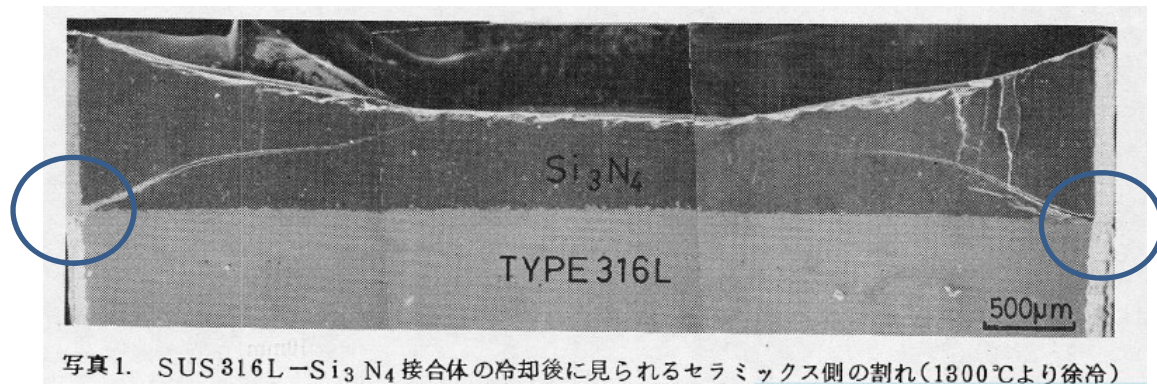
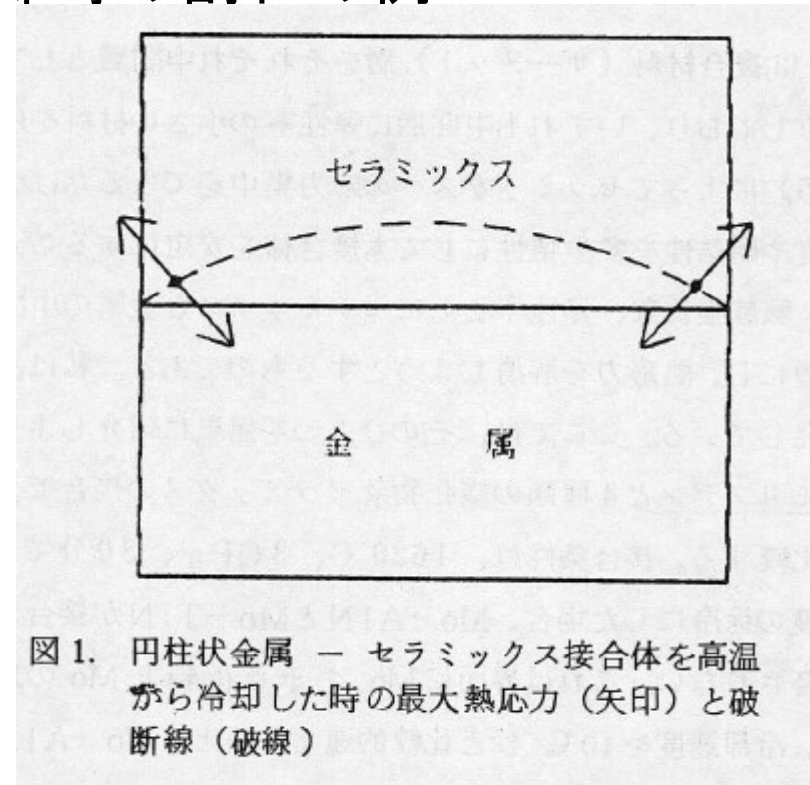
セラミックと銅のろうづけ部に他の部分では割れは見受けられなかった。またろうづけの金などの部分はわからず、

応力集中の計算結果と冷却時の割れの例



計算(ANSYS)による応力が
端に集中している描像

右レポートにあるように
端に応力が集中しわれ
る猫像が我々のセラ
ミック窓の割れ方に非
常によく似ている。



産総研:菅沼氏 レポートより

Ref. K.Suganuma, et. al. ,Ann. Rev. Mater. Sci 1988.18:47-73 42

20kW投入時のCold窓から窒素タンクへの入熱(ブレード線)

表 3・5 材料の熱伝導積分値
FRP 以外は [信貴, 平井監訳: 低温工学ハンドブック, 内田老鶴園新社 (1982)]

T _i (K)	$\int_{T=K}^{T_i} \lambda dT$											
	[×10 ² W/m]						[×0.1 W/m]					
	銅		マンガニン	黄銅	アルミニウム	ステンレス鋼 303, 304, 316, 317	ガラス, バイレックス, 石英	合成樹脂		FRP		
電解銅	リン脱酸銅	テフロン						ナイロン	G-FRP (G-10 相当品)	C-FRP (T-300 相当品)		
6	8.0	0.176			0.0063	2.11	1.13	0.321		1.64	1.36	
10	33.2	0.785			0.0293	6.81	4.4	1.48		5.07	4.10	
20	140	3.95			0.163	20.0	16.4	8.23		14.4	11.3	
40	406	16.4	1.54	4.76	96.2	58.6	50.8	38.5		36.9	29.3	
60	587	35.5	3.75	10.4	170	115	98.6	85.9		65.1	45.9	
76	686	53.9	5.76	16.2	220	175	130	131		92.0	83.9	
80	707	58.9	6.28	17.7	232	194	139	142		99.5	92.5	
100	802	85.8	8.98	26.5	284	292	187	204		141	146	
120	891	115	11.8	36.5	330	408	237	269		189	219	
140	976	146	14.7	47.8	376	542	287	336		246	316	
160	1060	180	17.8	60.3	420	694	338	405		311	441	
180	1140	215	21.0	73.8	464	858	390	475		385	597	
200	1220	253	24.3	88.3	508	1030	442	545		468	789	
250	1420	353	33.4	128	681	1500	572	720		718	1452	
300	1620	461	43.8	172	728	1990	702	895		1031	2424	

20kW時のブレード線一本当たりの入熱 Q_{c_all} : T₁=93K (T2-3) & T₂=180K (T2-6), L=200mm, A=100mm²

$$Q_{c_all} = \left(\frac{A}{L} \right) \int_{T_1=93K}^{T_2=180K} \lambda(T) dT = \frac{100mm^2}{200mm} \times 37000W / m = 18.5W$$

Powerなしの時、ブレード線一本当たりの入熱 Q_{c_static} : T₁=84K (T2-3) & T₂=107K (T2-6)

$$Q_{c_static} = \left(\frac{A}{L} \right) \int_{T_1=84K}^{T_2=107K} \lambda(T) dT = \frac{100mm^2}{200mm} \times 10600W / m = 5.3W$$

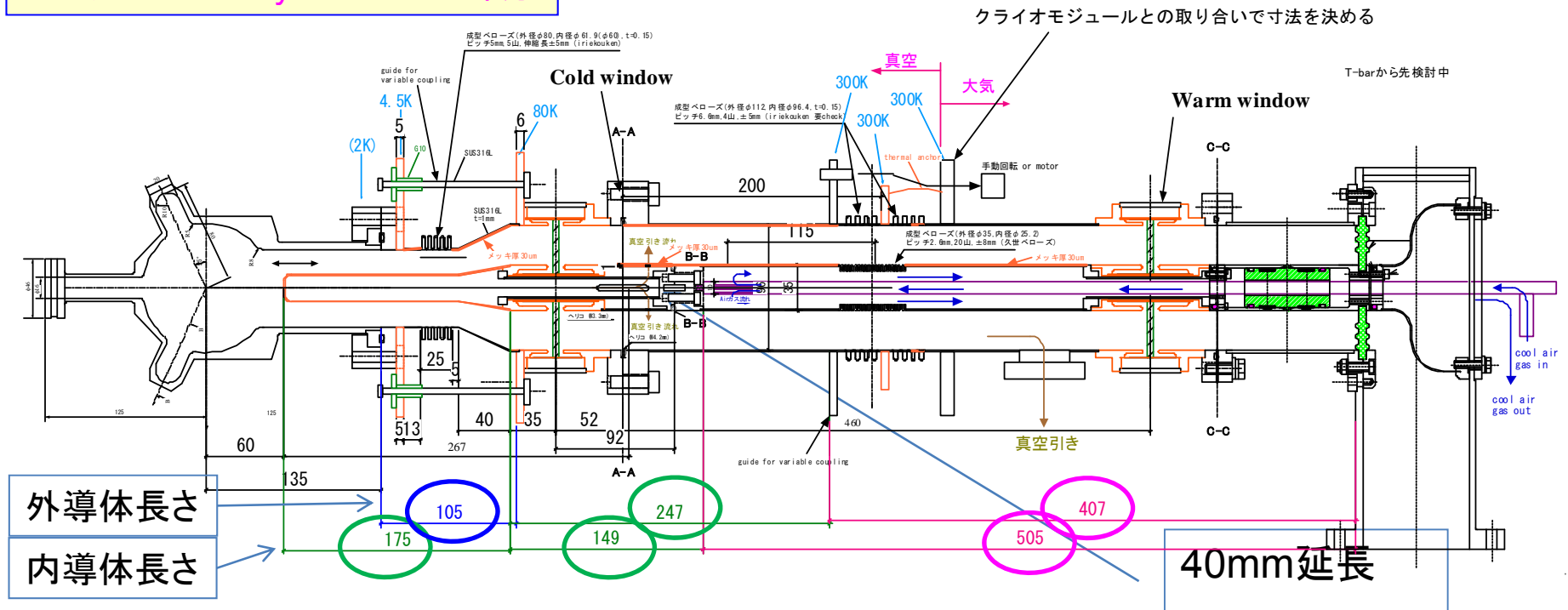
Cold窓からブレード線4本を伝っての20kW入れた際の窒素タンクへの入熱は
 $Q_{dynamic} = (Q_{c_all} - Q_{c_static}) \times 4 = (18.5W - 5.3W) \times 4 = 52.8W$

ラフな予想値(30-40W)より大きい。Simulationで詰める必要あり。

青: 4.5Kへのdynamic loss部分
 緑: 80kへのdynamic loss部分
 ピンク: 300Kのdynamic loss部分

Input couplerの入熱計算値

Cold窓から80Kアンカーへの入熱は緑部分



20kW+20kW(=40kW)の全反射時のDynamic lossの計算値

Coldのセラミック窓の発熱は1W以下

Dynamic loss	2K	5K	80K	300K
内導体	-	-	29.4W	13.7W(forced air cool)
外導体	-	3.25W	2.5W	4.1W
Total	-	3.25W	31.9W	17.8W