

ERL main linac 用input coupler開発の現状
-- test benchによるhigh power component testまで--

2009/4/1

阪井寛志、石井篤、篠江憲治(東大物性研)

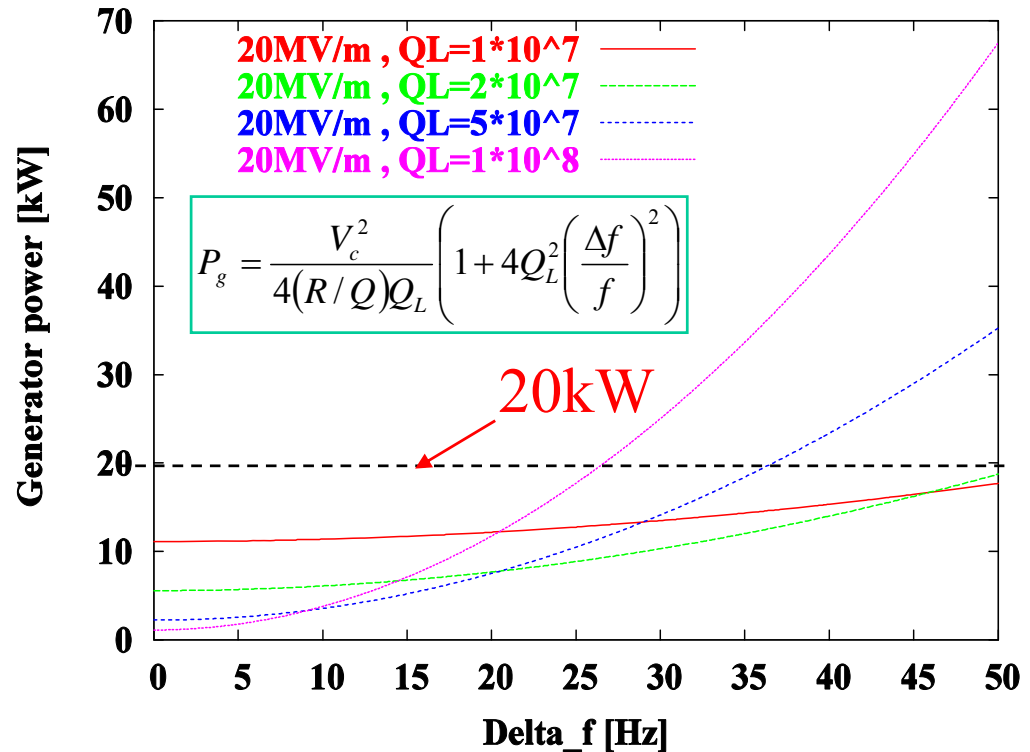
梅森健成、古屋貴章(KEK)

沢村勝(原研)

Input couplerの設計

ERLではエネルギー回収と超伝導空洞の高いQ値のおかげで投入パワーは少なくすむが、実際には高いQL値では超伝導空洞の共鳴幅が非常に狭くなり、外乱の影響などによる周波数のずれからデチューニングが厳しくそれを補うための投入パワーが大きくなる。(右図参照)。今のところ外乱(microphonics)の影響は大体50Hz以下と見積もられており、そこから逆算すると $QL = 2 \times 10^7$ にて20kWのパワーが必要となる。さらにpulseでのカップラーのconditioningなどを考えて我々はさらに低いQLに変えるような設計方針とした。

投入パワーと周波数のずれの関係

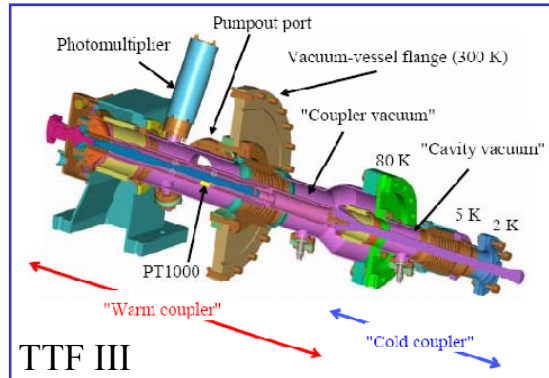


共振周波数からの周波数のずれ

ERL main linac couplerパラメータ

- ・周波数：1.3GHz
- ・加速勾配：最大 20MV/m
- ・投入パワー：最大CW 20kW
- ・カップリング可変：QL = $5 \times 10^6 - 2 \times 10^7$

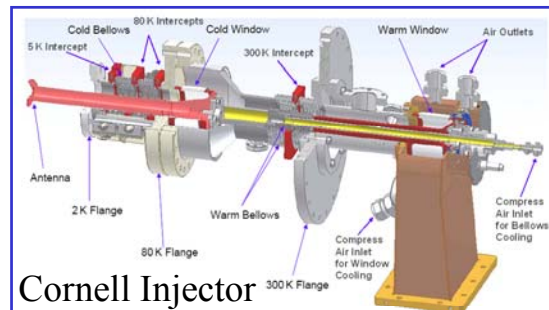
超伝導空洞カップラーの代表例(1.3GHz対応)



TTF III (for LC & XFEL):

- Adjustable coupling (16 mm)
- Cylinder type ceramic window
- 5 kW CW SW (BESSY)

我々の
ERLに採用



Cornell Injector (for ERL):

- Adjustable coupling (16 mm)
- Cylinder type ceramic window
- Upto 50 kW CW TW (Cornell)
inner conductor cooling by air

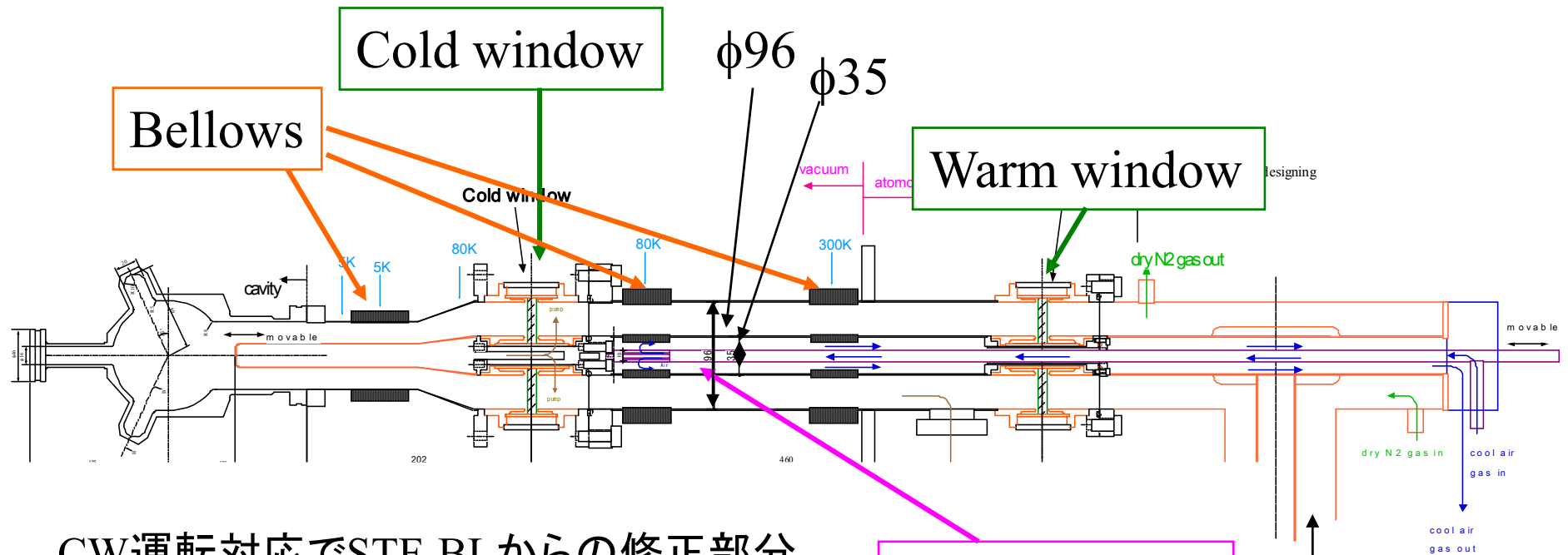


KEK STF-Baseline (for ILC):

- Fixed coupling (now changing)
- TRISTAN type coaxial ceramic window
(pulse 1MW 1.5ms 5Hz @1.3GHz (STF-BL))
(CW Max 800kW @500MHz (KEKB type))

Design of ERL main input coupler (ver.1)

基本設計は1.3GHz仕様のKEK STF-BL couplerから開始。特にピークパワー(max 1MW)の高いパワー投入の実績と、粉塵混入を避けるため、同様にDiskセラミック窓2枚方式は採用。但し、CW運転に対応するように下記に示す発熱などに考慮した設計に修正。



CW運転対応でSTF-BLからの修正部分

- coupling 可変 ($QL=5 \times 10^6 - 2 \times 10^7$)
- 内導体の強制空冷
- double ceramic of same size
- disk type ceramic window (HA997)
- 60Ω インピーダンス → 内導体の発熱軽減

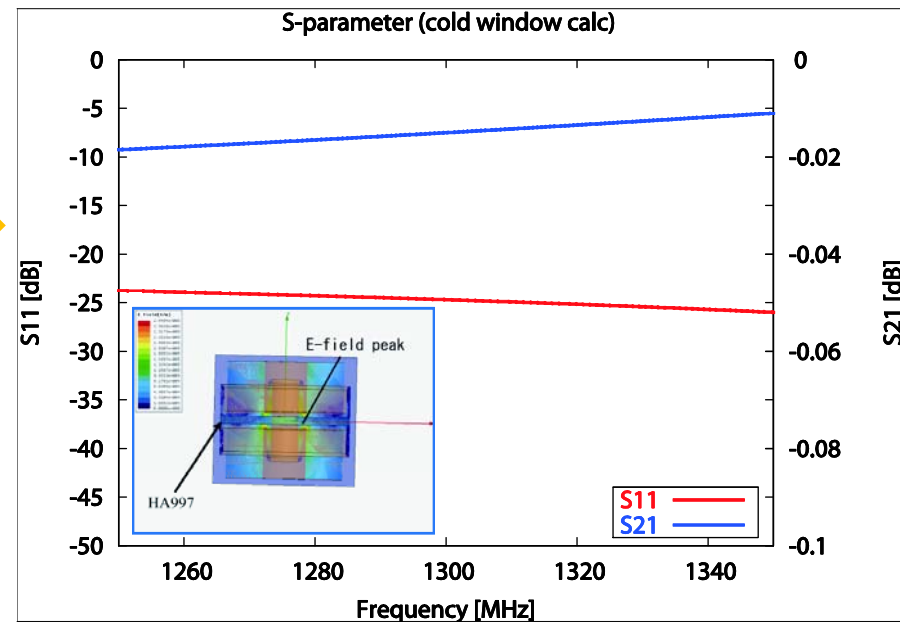
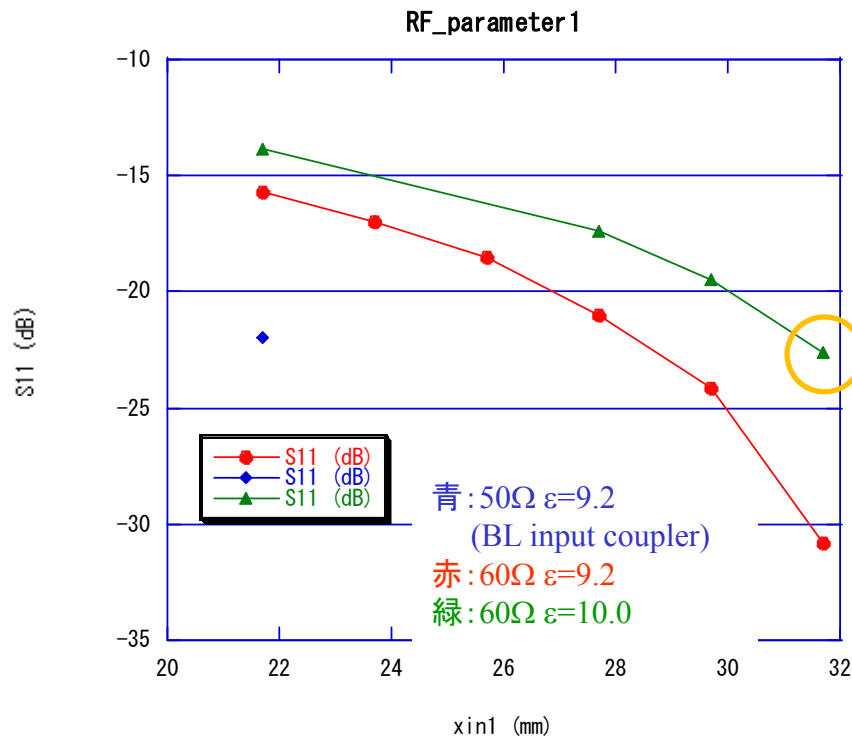
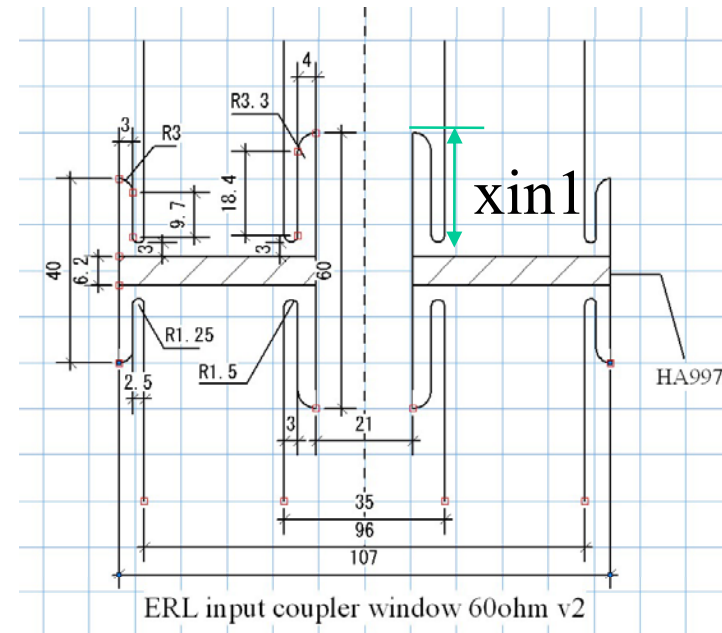
Inner rod:

- Gas cooling
- change Q_{ext}

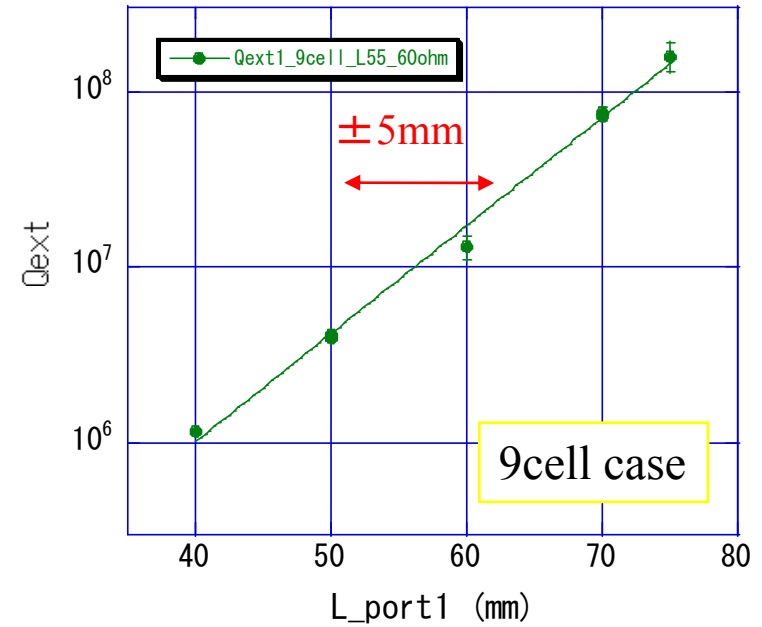
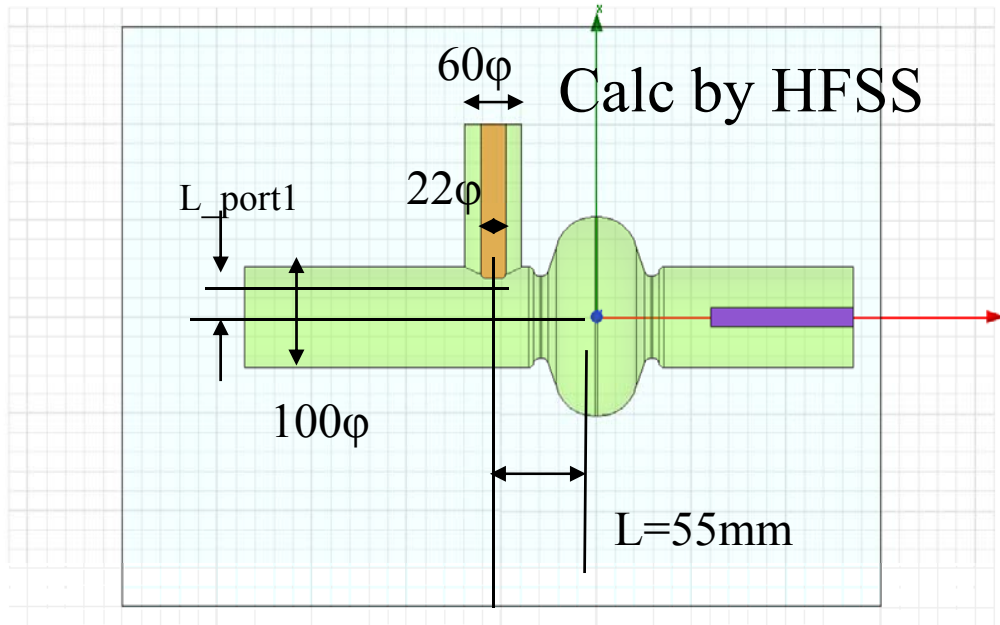
RF

RF設計 セラミック窓 (50Ω→60Ω)

BLのセラミック窓から、60Ω+ HA997に対応、chokeの部分の長さを変化させて反射は計算で S11で-25dB程度まで抑える。

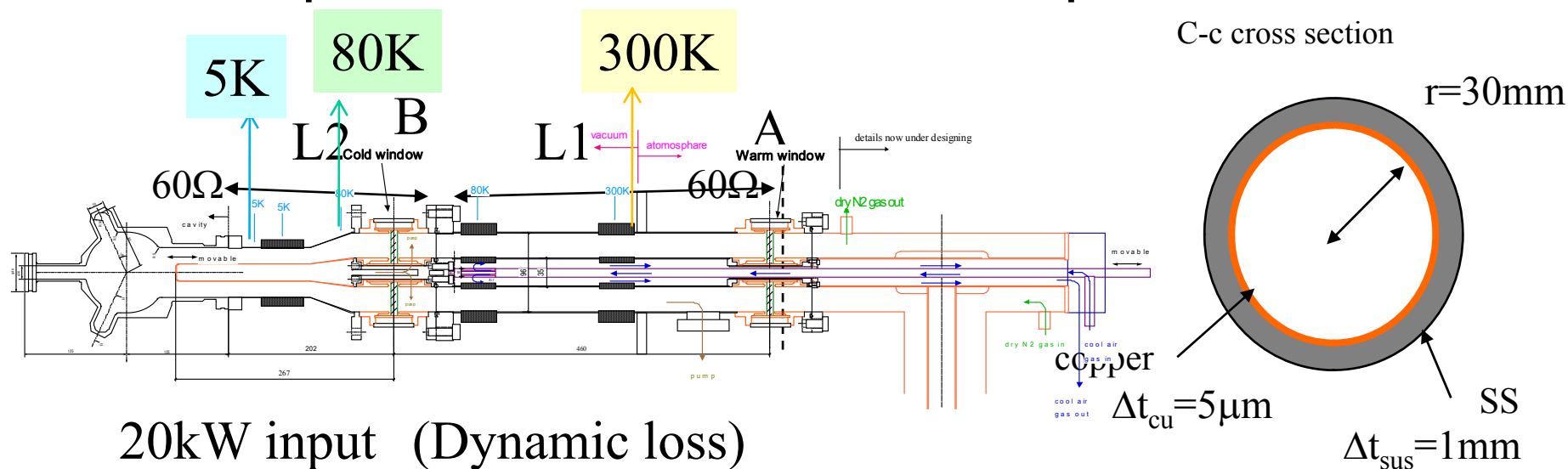


Coupling可變範圍(計算)



- Q_{ext1} = 5 × 10⁶ ~ 2 × 10⁷
→ L_{port1} = 51.3 ~ 61.1mm
Variable range = ±5mm

Expected heat load in CW operation



	L1	L2	Total (1+2)
Inner loss	12.2W	8.55W	20.75W
Outer loss	4.5W	3.15W	7.65W
Total	16.7W	11.7W	28.4W

(Static loss 外導体のみ)

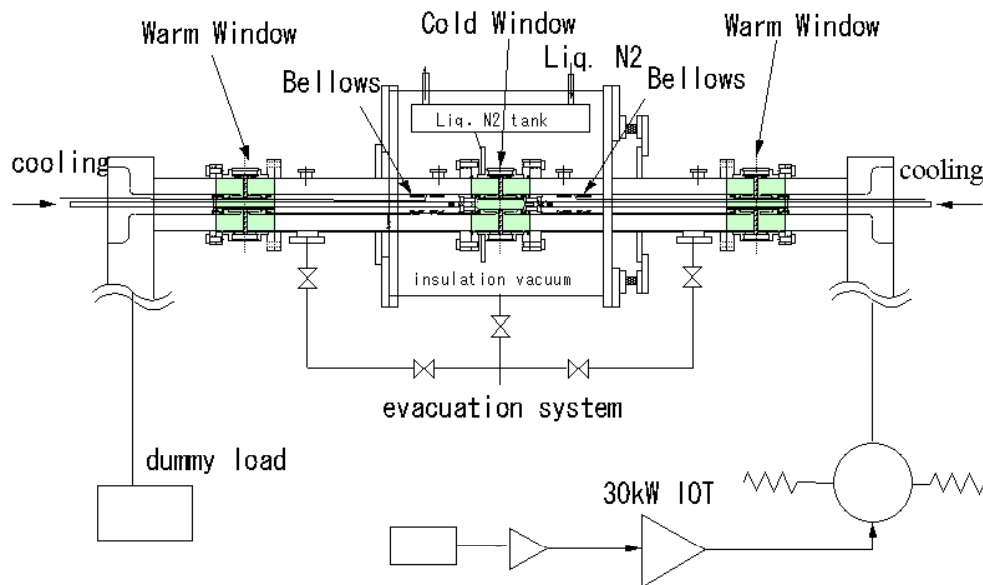
calculation	300K → 80K	80K → 5K	5K → 2K
Input heat Q_c	12.2W	0.734W	0.359W

ceramic	Loss (HA95)	Loss (HA997)
A	5.4W	1W
B	5.4W	1W
Total	10.8W	2W

(内導体の入熱やアンカーの細かい配置はクライオモジュールの設計も含めて現在調整中、RF off時は80Kで数W以下になる。)

入力カプラーの開発課題

- ◎ **セラミック窓とベローズ**の設計製作。
RF設計、機械設計の妥当性の評価。
- ◎ **ハイパワーカプラーテストスタンド**を用いた性能評価
上記セラミック窓、ベローズにCWで20kWのハイパワーを投入する。
20kW投入時の温度上昇
2次電子放出の成長過程を測定
し、パワー投入下でのセラミック窓、ベローズなどの出来をみる。



Schematic diagram of high power teststand



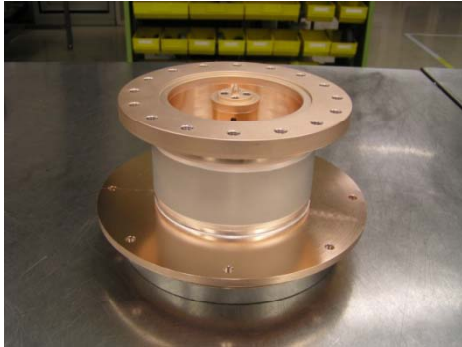
1.3GHz CW
30kW IOT
(JAEA)



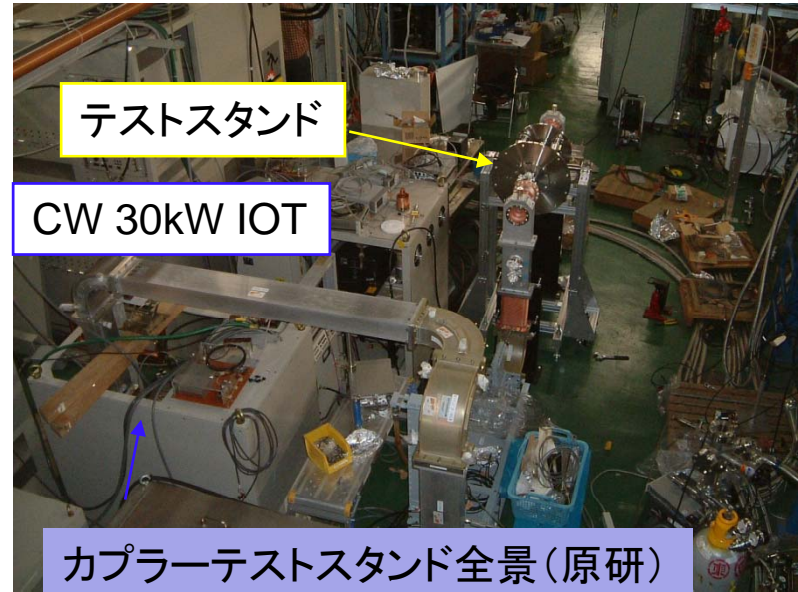
1.3GHz
CW 40kW
Isolator
(JAEA)

Componentと組み立て

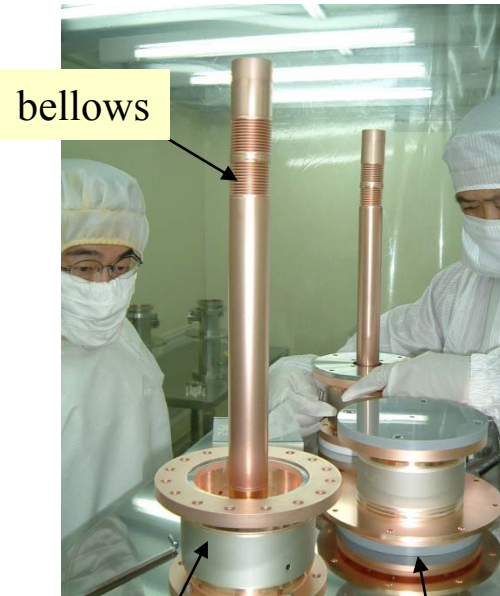
作成されたセラミック窓
(東芝電子管デバイス)



外導体の様子。
(ピロリン酸銅めっき10um)



Clean roomでの組み立て(原研)

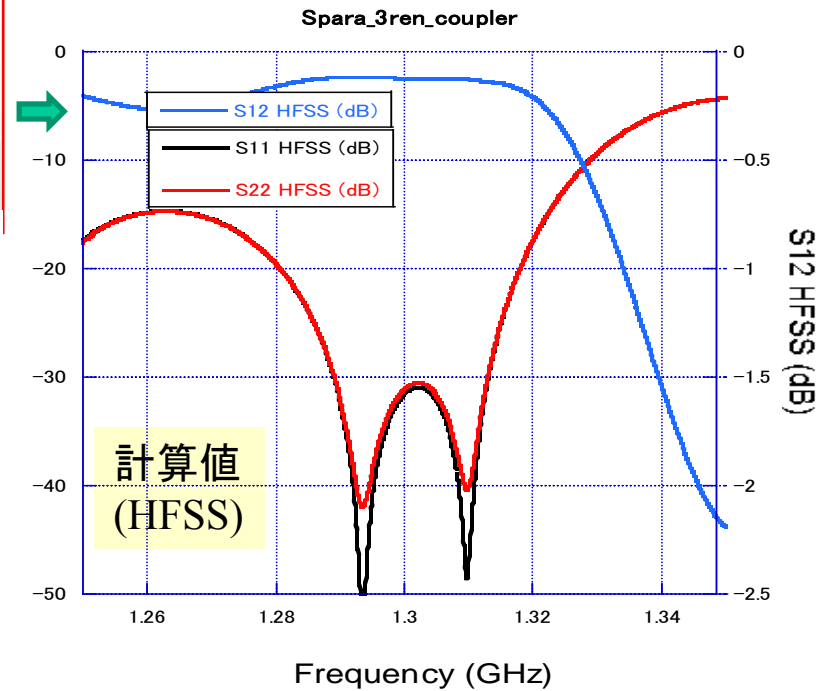
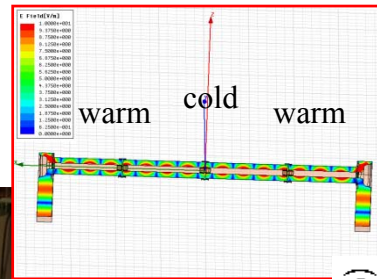
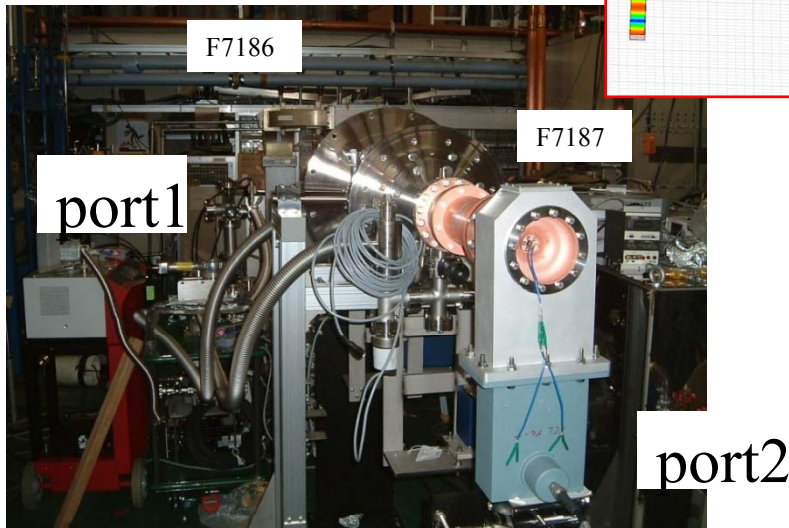


Warm窓

Cold窓

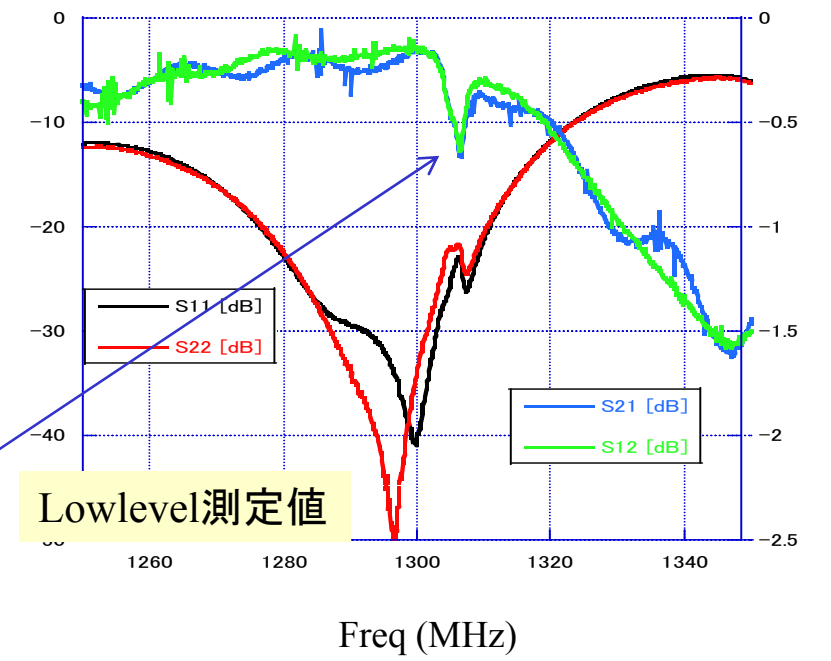
機械的設計や組み立て、メッキの出来などは良好であった。組み立て後の真空リークも今のところなし。(1*10^-10 Pa m3/s以下)

3連セラミック窓+doorknob のlow level測定

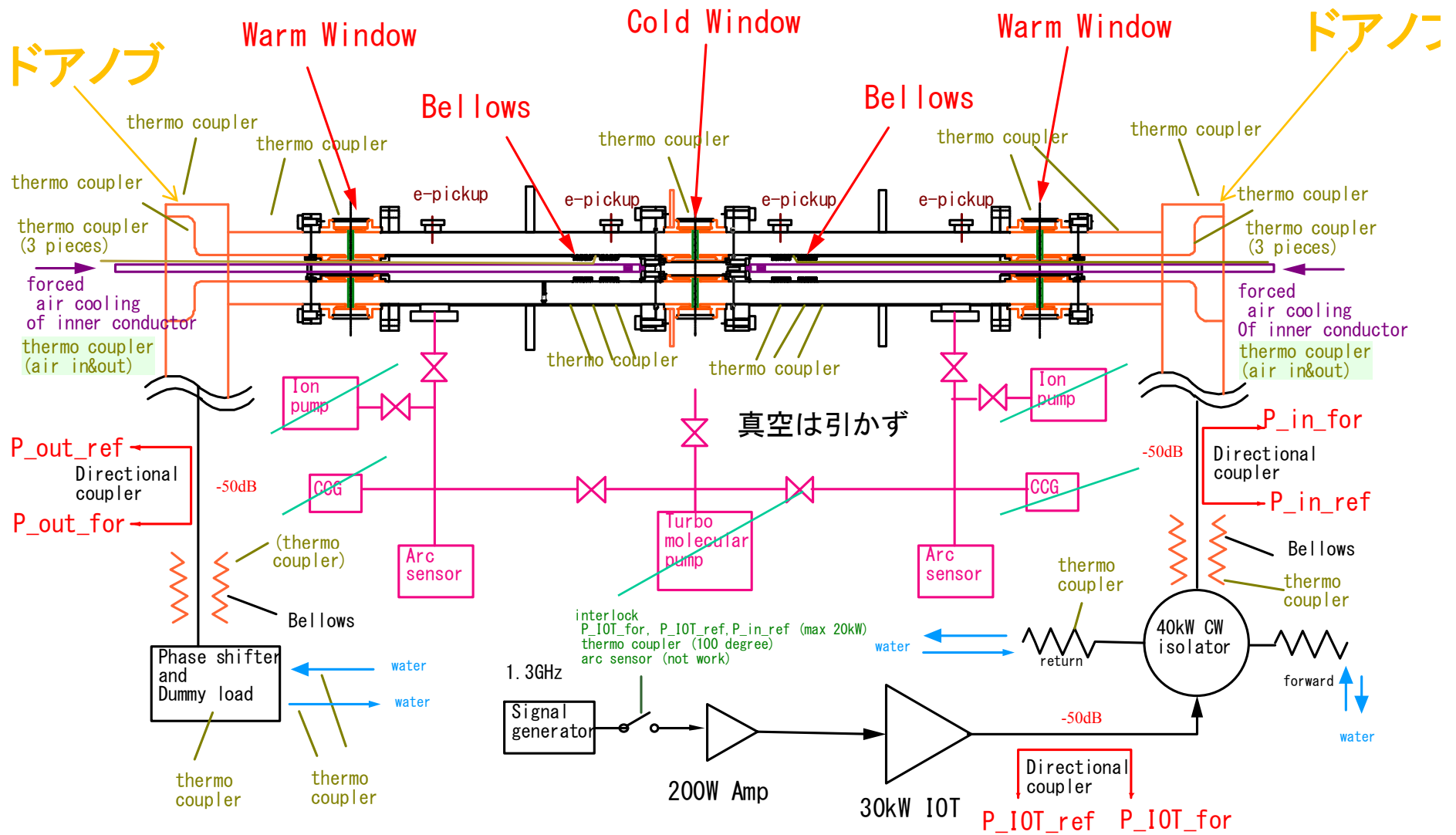


1.3GHzでの S-para	Low level 測定値	HFSS計算値
S11	-40.4dB	-31.5dB
S12	-0.153dB	-0.123dB
S21	-0.156dB	-0.123dB
S22	-34.0dB	-31.1dB

測定値と計算はまあまああっているようだが、S21,S12に1.3GHz近くに計算にはないPeakが見られる。(1306.5MHz)、peakは一応escapeしているため、このままhigh power testをまず行った。



Coupler test stand block diagram for high power test



熱電対を30本用意し、dataを1秒ごとに撮取。Interlockは温度を最初60度に設定。

熱電対Data assign

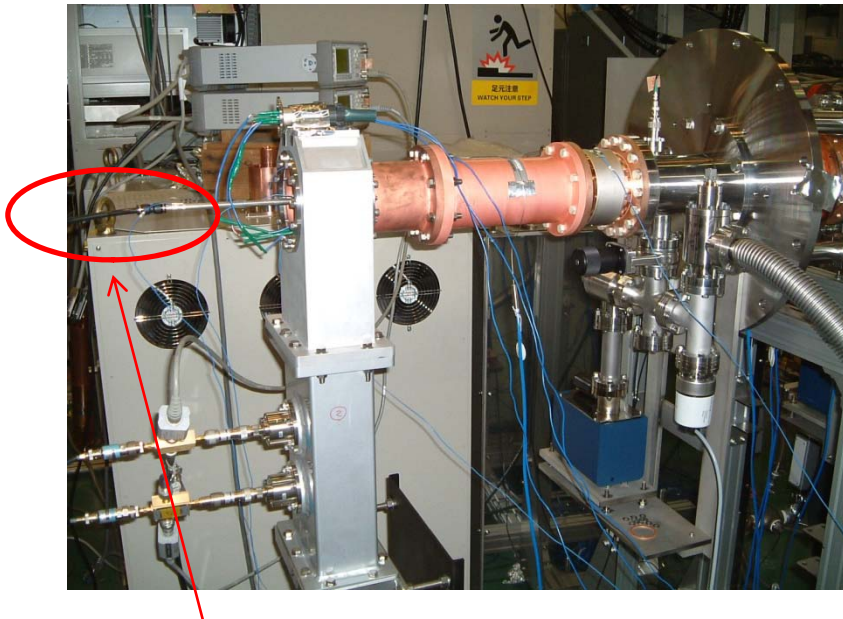
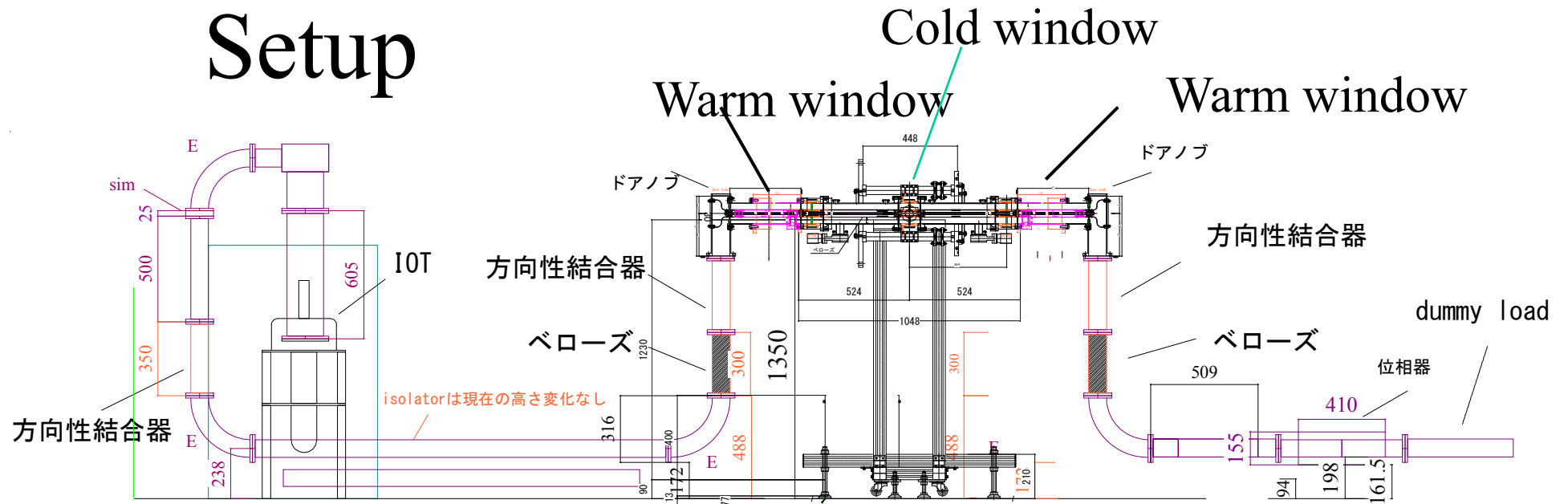
	T1	T2	T3
ch1	延長導波管(上流)	warmセラミック窓(上流)	Isolatorロード
ch2	外導体(上流1)	Coldセラミック窓	ロード本体
ch3	外導体(上流2)	warmセラミック窓(下流)	導波管ベローズ(上流)
ch4	外導体(上流3)	ドアノブ(上流)	導波管ベローズ(下流)
ch5	外導体(下流1)	ドアノブ端板(下流)	内導体NO.3(下流)
ch6	外導体(下流2)	冷却エア IN (上流)	未接続
ch7	外導体(下流3)	冷却エア OUT (上流)	未接続
ch8	延長導波管(下流)	冷却エア IN (下流)	内導体NO.1(上流)
ch9	ロード冷却水(IN)	冷却エア OUT (下流)	内導体NO.2(上流)
ch10	ロード冷却水(OUT)	ドアノブ端板(上流)	内導体NO.3(上流)

内導体ベローズ拡大(外部配布禁止)

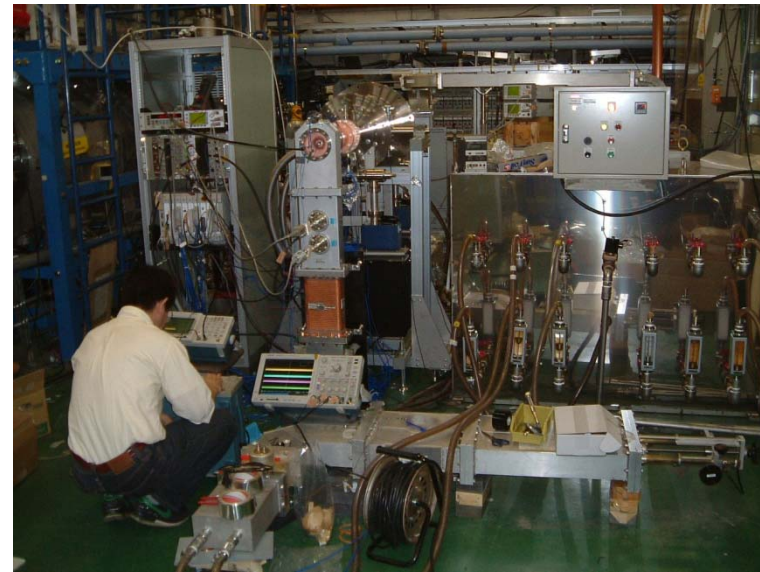
Detail 部分なので割愛させていただきます。

強制空冷時の中に流す空気の流量(max)は約60l/min(およそ1m/sの流量)
(この量はCornell injectorに使用している流量より6/7程度少ない。)

Setup



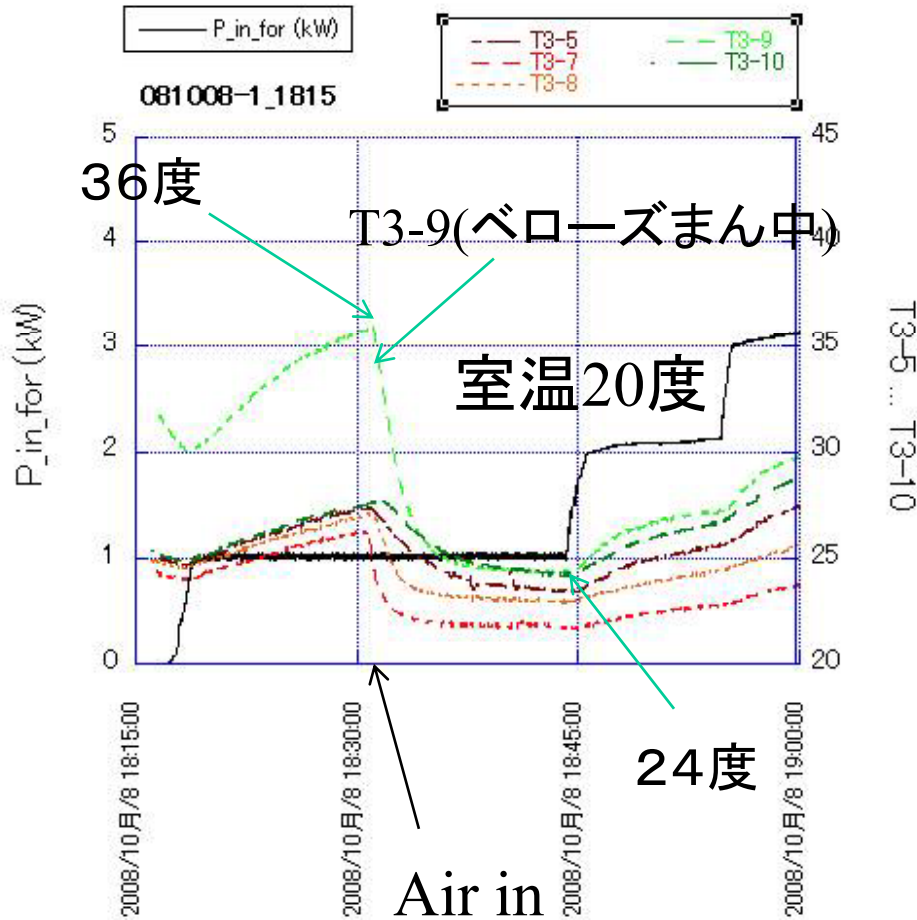
Inner rod for air cooling



Setup of monitor system

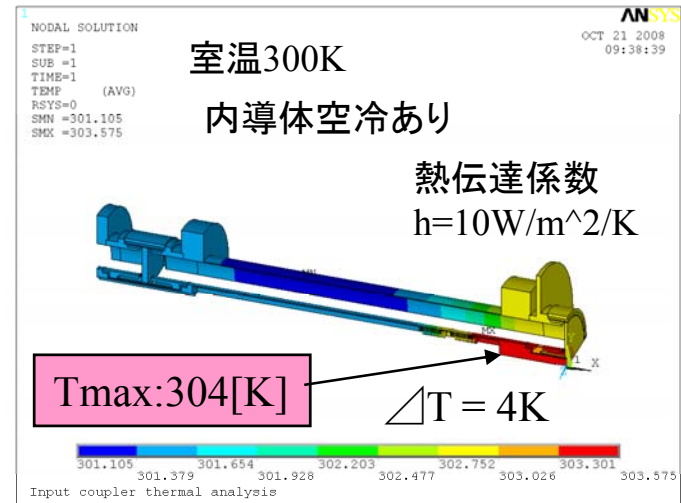
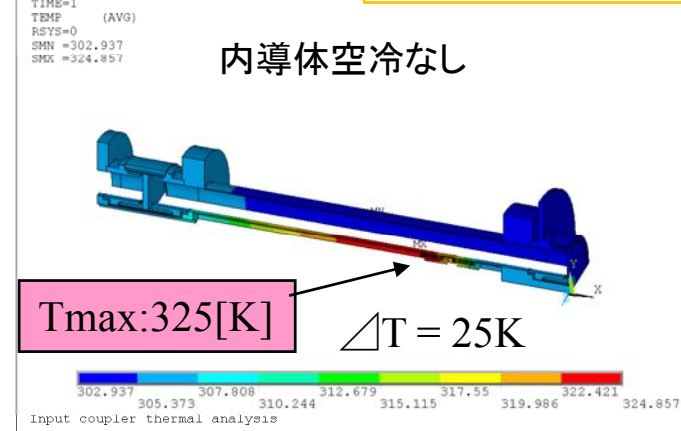
内導体冷却の効果

1kW投入時



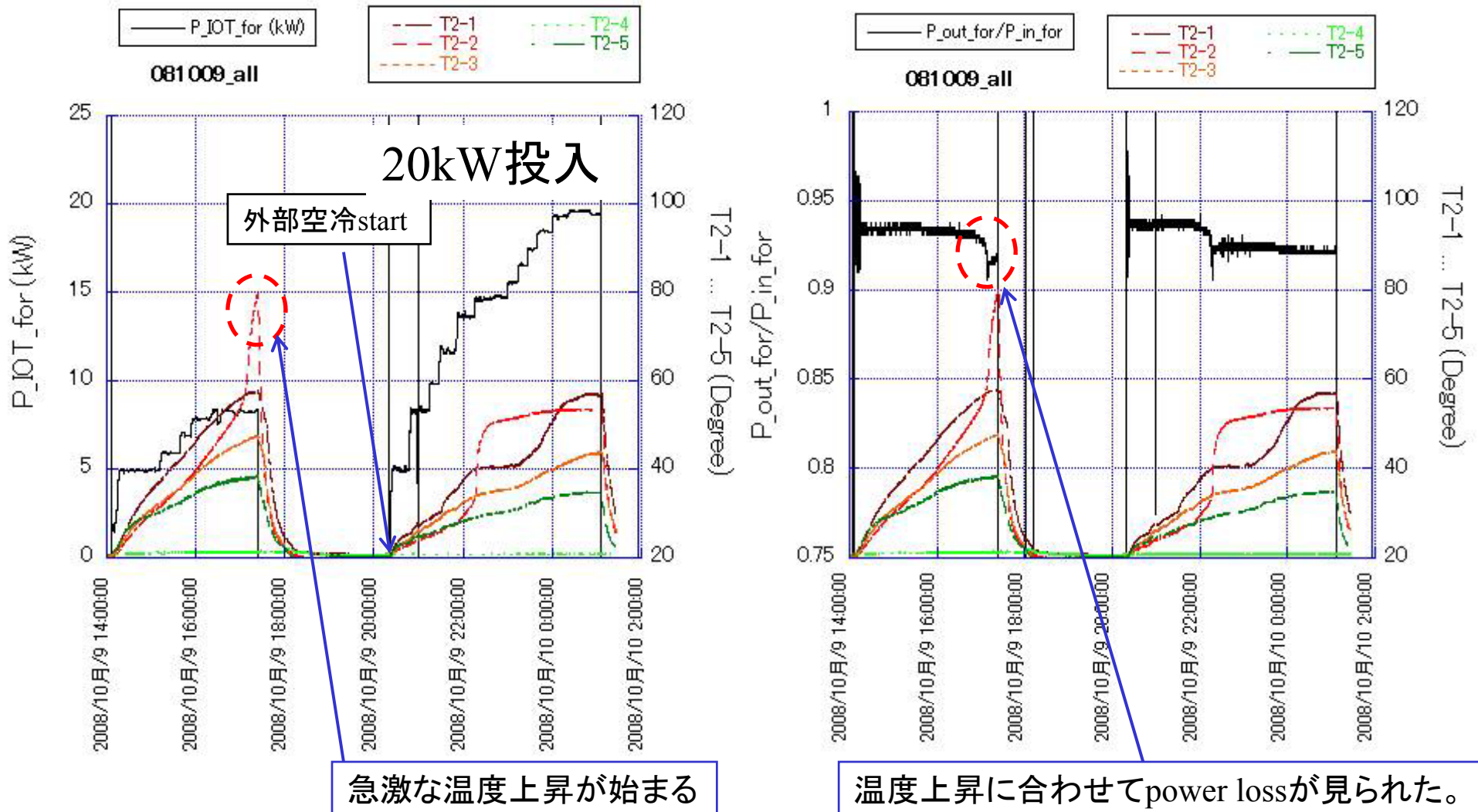
Ansys

室温300K 1kW投入時



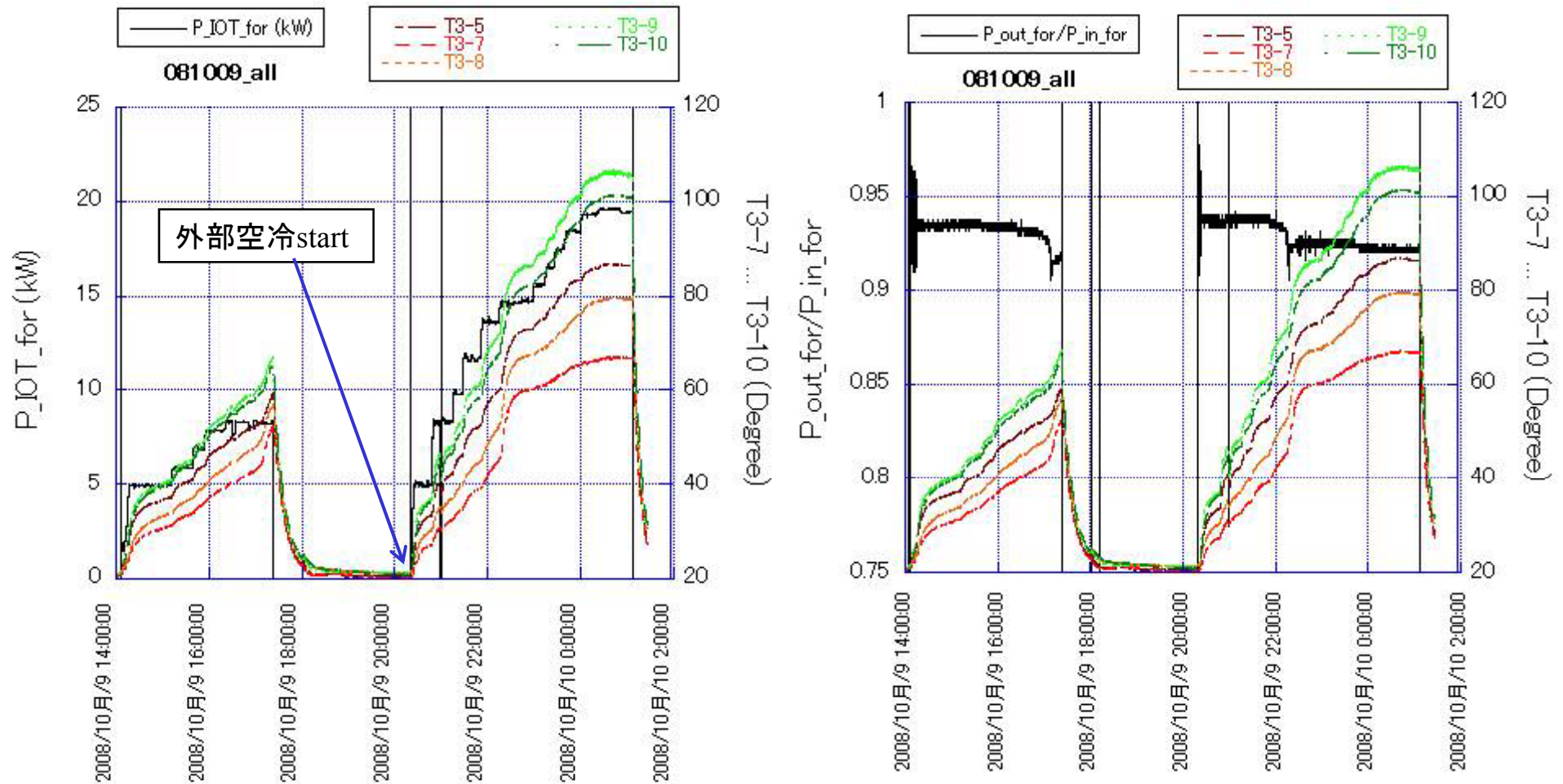
1kW投入した際にベローズの温度上昇を内部冷却なしとありで比較した。内部冷却なしでパワー投入時は36度($\Delta T=16$ 度)の温度上昇であったが、冷却後は24度($\Delta T=4$ 度)の温度上昇にとどまり、温度上昇が少なくとも1/4に抑えられているのがわかった。右のsimulationでも温度上昇が空冷なしでは24度に対し、空冷ありでは4Kとなり大体実験結果を再現していると言えよう。

2008/10/9 (T11-T15)(セラミック窓部分)



外部空冷なしのときにT2-2(Cold窓)の温度上昇が激しくなった。その時にpower lossが見られた。外部空冷後もpower lossと同期して急激な温度上昇が見られたが、その温度のstart pointは異なる。最大温度は空冷前はT2-2(Cold窓)で80度、空冷後はT2-1(Warm窓上流)で57度に下がった。この現象はこれ以外にあと2回同じ測定を行ったが、再現性があった。

2008/10/9 (T25,T27-T30)(ベローズ部分)



ベローズ内の温度は内部、外部空冷時でT3-9(ベローズ上流まん中)の温度上昇が一番大きく20kW投入時で106度まで到達。但し、下流の温度は20kW投入時のT3-5(ベローズ下流)で86.8度とくらべ、上流の同じ位置T3-5の温度101度に対し、14度も低い値となっている。全体的に上流のほうが温度上昇が大きい。

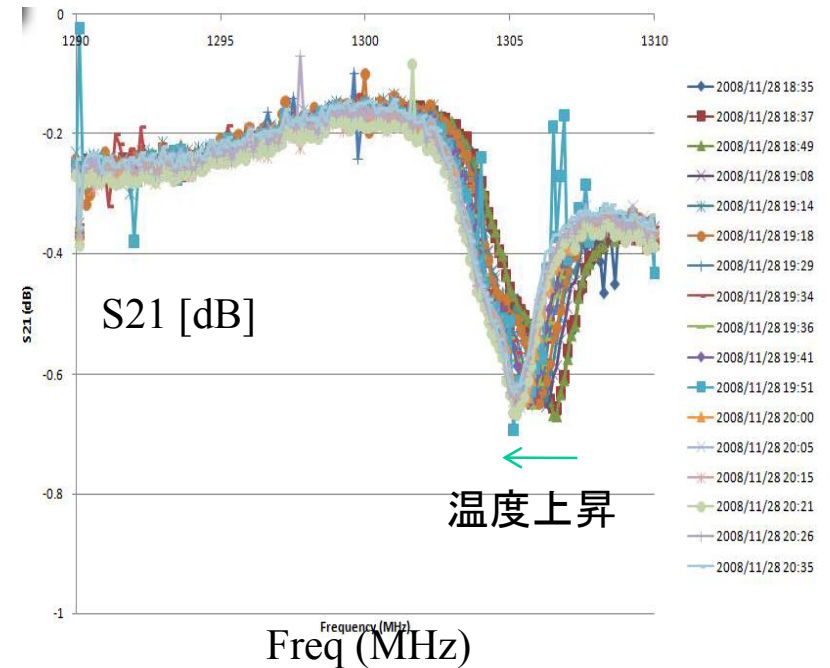
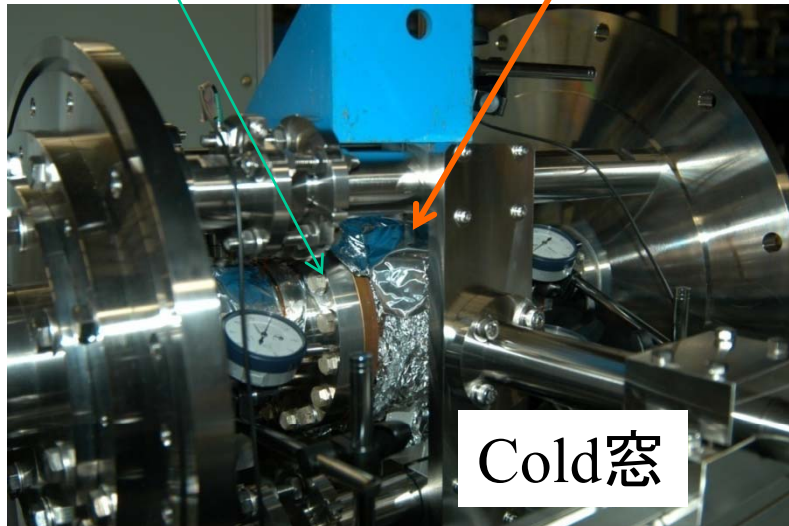
温度とS-parameterの相関(low level)

次にcold窓の温度上昇とpower lossとの相関を確認するため、cold窓にHeaterを巻き温度上昇をさせながらlow level測定を行い、S-parameterの変化の様子を見る。

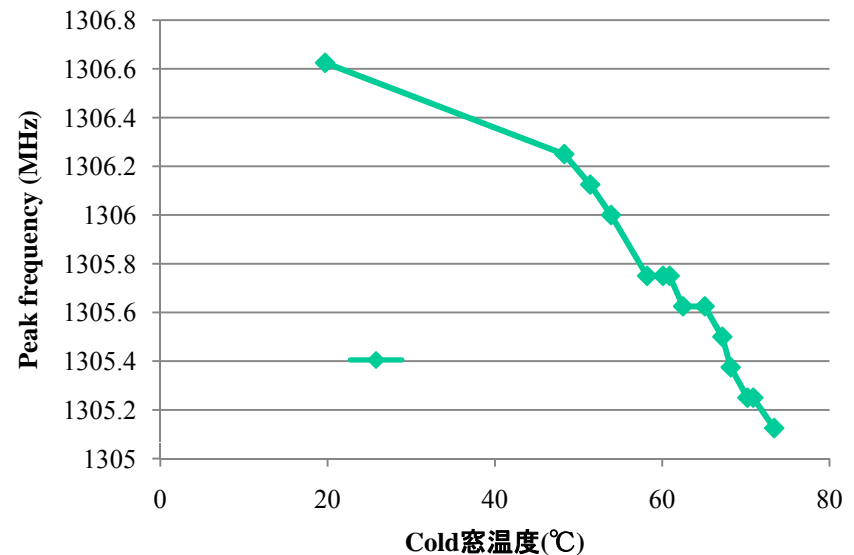
Cold窓の温度に対し、peakの変位はおおむねlinearに変化している様子が窺われる。これがさらに大きく変化したときに1.3GHzに当たる可能性があることがわかった。ちなみにこのとき、ダイヤルゲージにて変形を見たところ、横方向に60um程度の変位が見られた。

ダイヤルゲージ

Heaterをcold窓に巻く

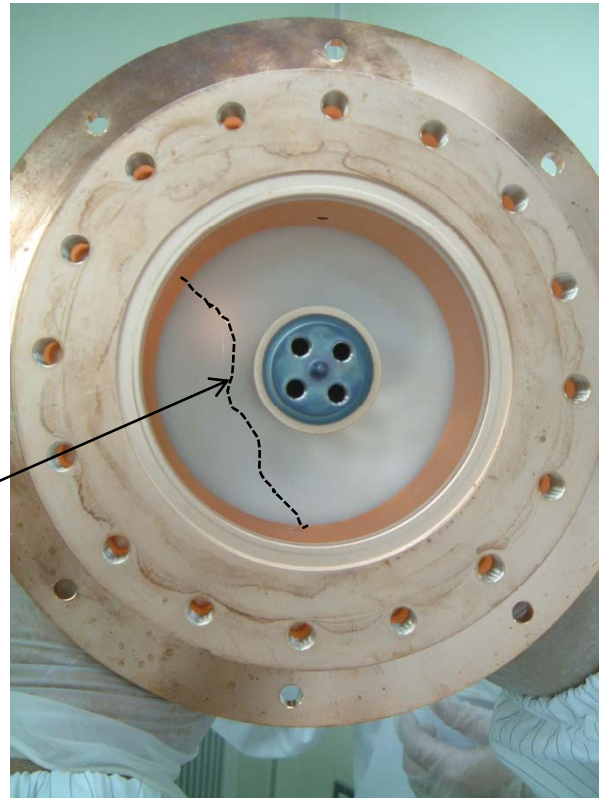


S12 peak freq (MHz)



Open test stand

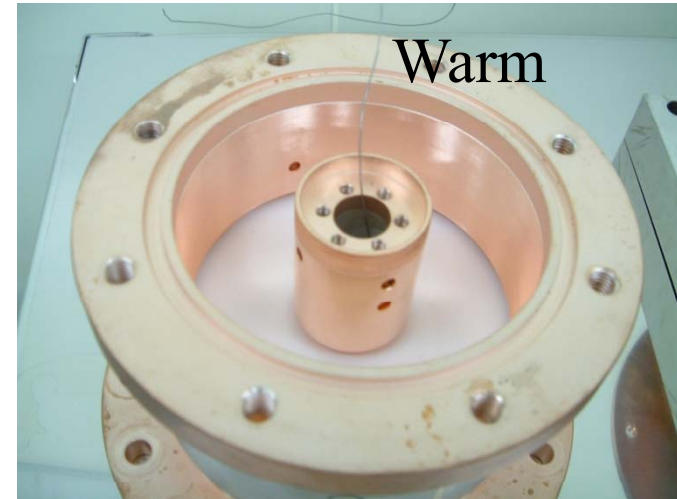
Cold
window



割れてました

内導体が真っ黒(銅が酸化しているようだ)。
セラミックはおそらく内導体に急激な熱がかかり、機
械的な変形の後、割れたものと思われる。

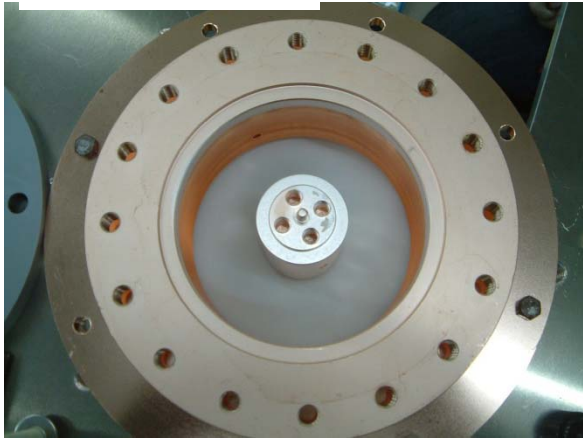
Warm窓のセラミック、ベローズは一応無事。



セラミック窓単体low level測定

現在のカプラーテストスタンドでは、Cold窓の発熱が問題である。
セラミック窓のS-parameterのlow level測定を行い、設計上問題ないかを確認する。
まずはcoldセラミック窓2つとwarm窓2つの測定を行った。

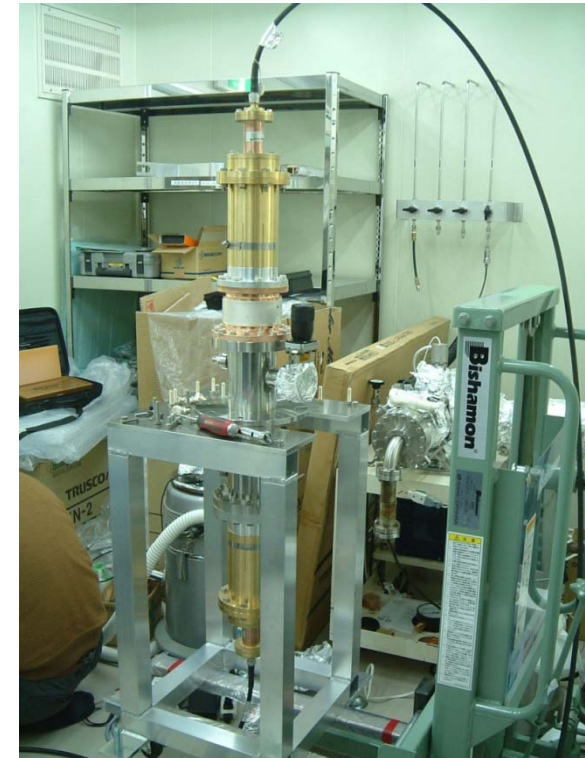
タイゴールド社の
セラミック窓



Cold窓はタイゴールド社の
セラミック窓と割れた
窓を測定

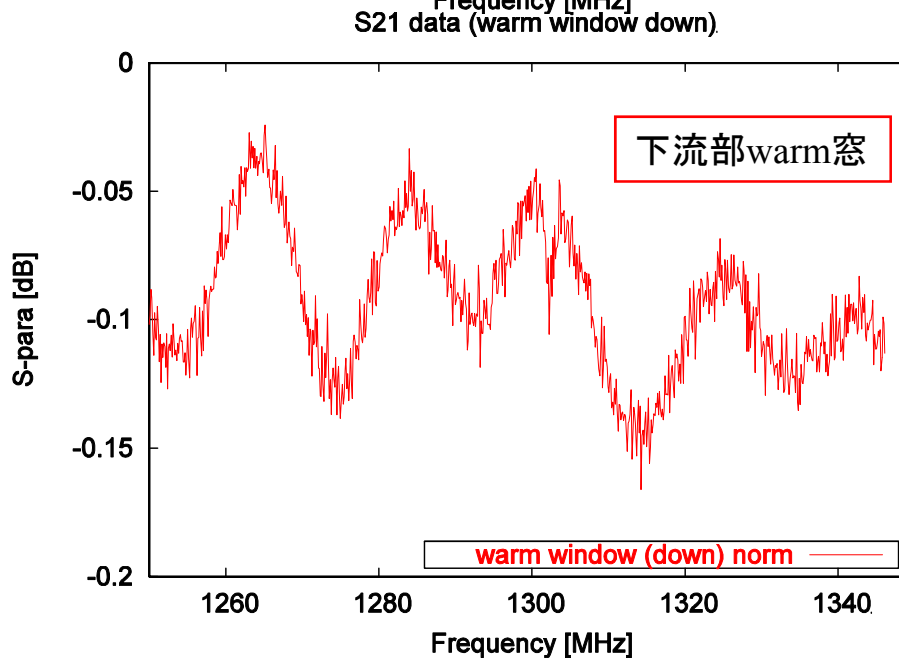
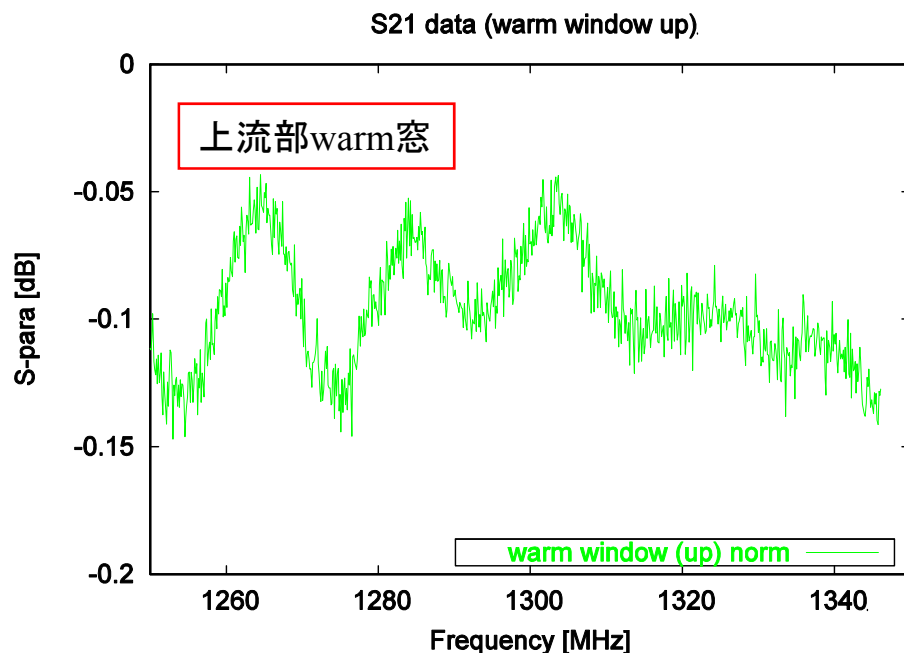
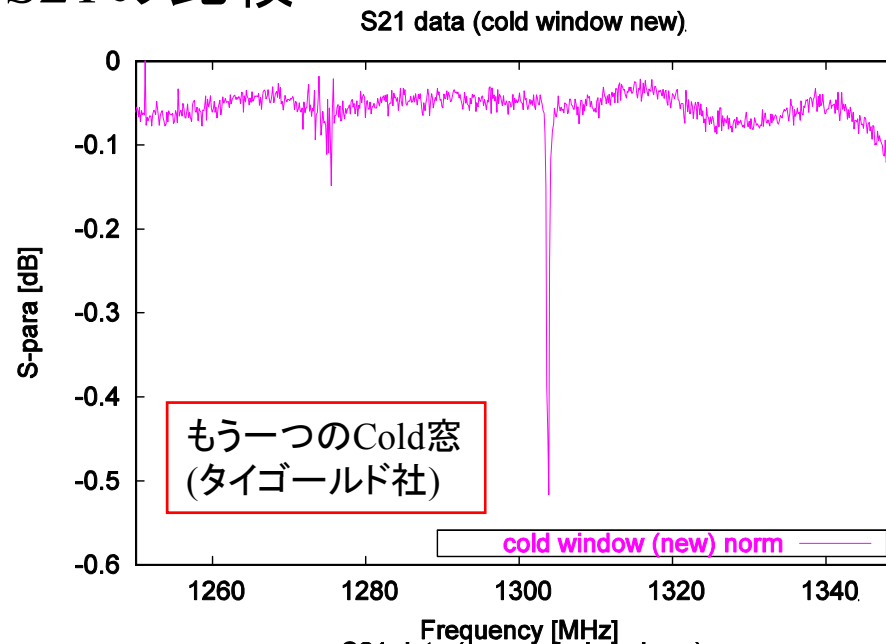
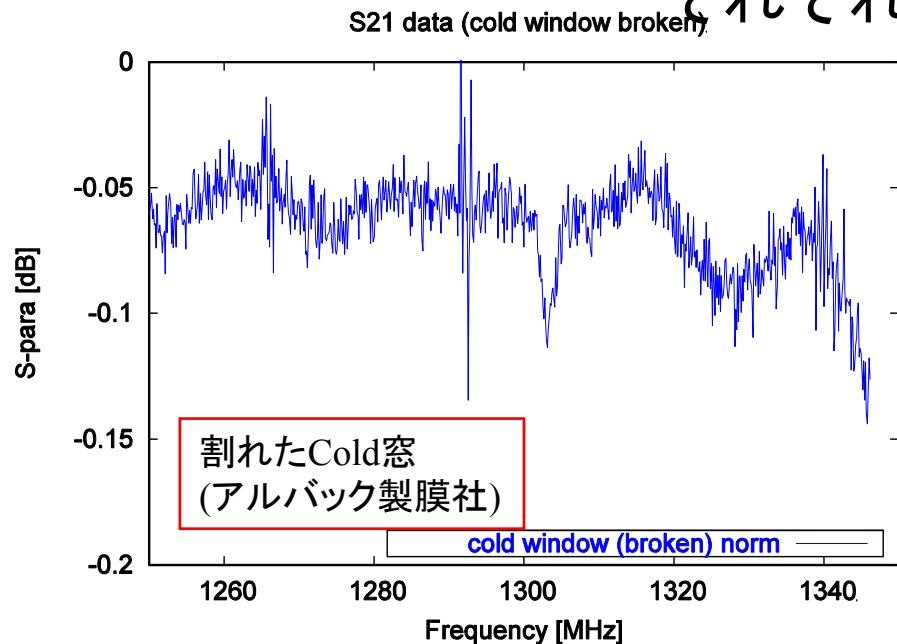


Cold窓setup



Warm窓setup

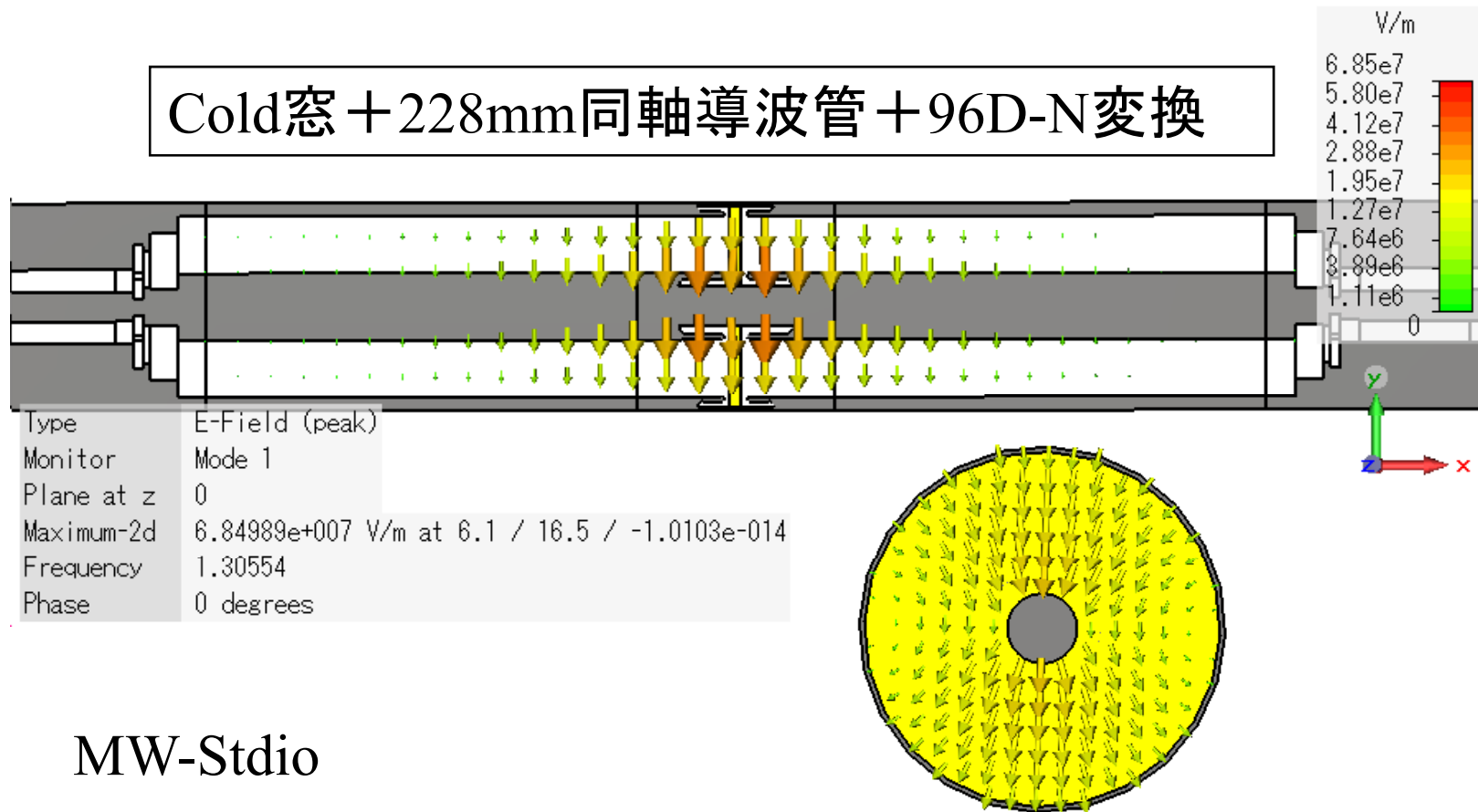
それぞれのS21の比較



1.305GHz付近に現れたpeakはセラミック窓固有のものであることがわかった。

ローレベル測定を行ったセットアップで固有値計算をしてみると...

Cold窓 + 228mm同軸導波管 + 96D-N変換

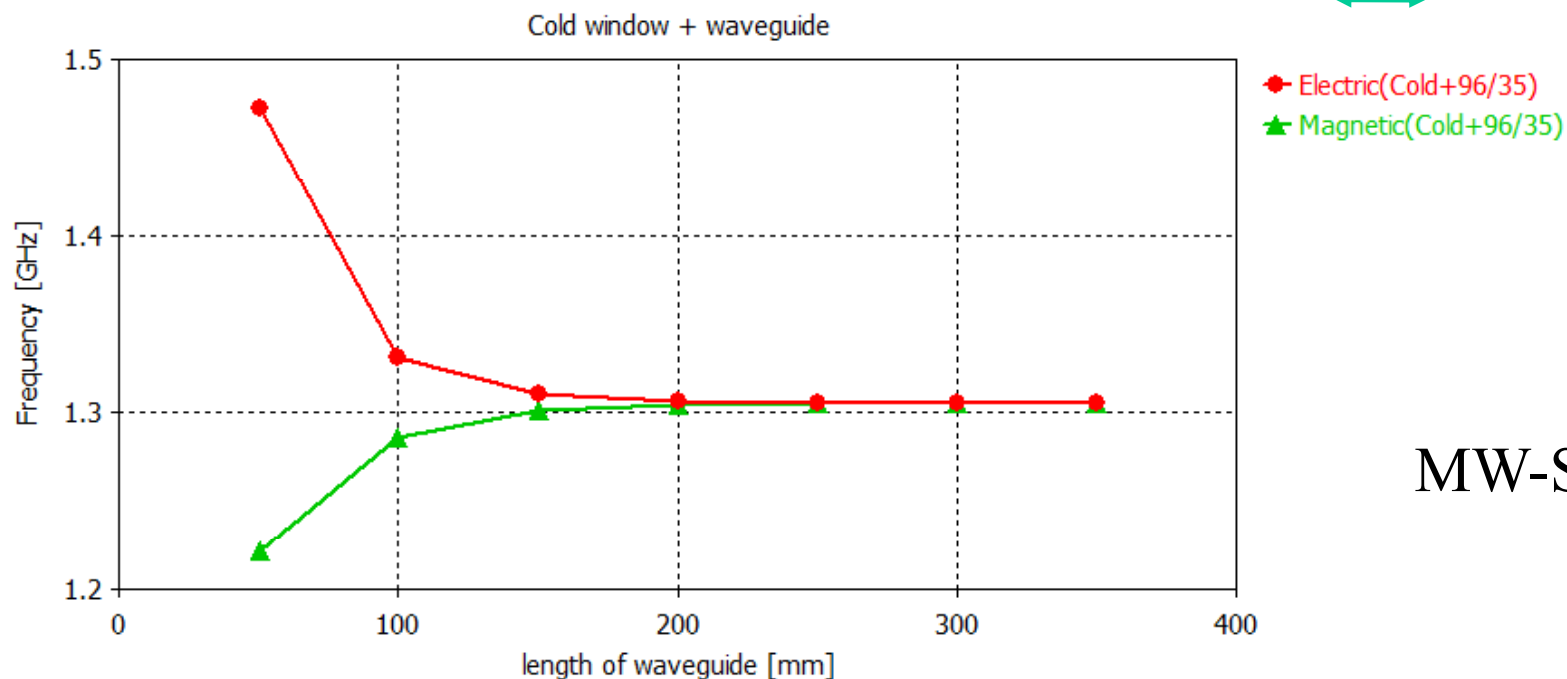
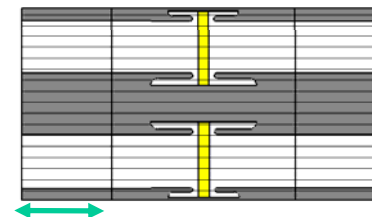


MW-Studio

1305.5 MHz Q=5.9e4 (バンド幅 22kHz)
というダイポールモードが現れた

同軸導波管の長さを変えた場合の 共振周波数の変化 (Dipole mode)

Cold窓+同軸



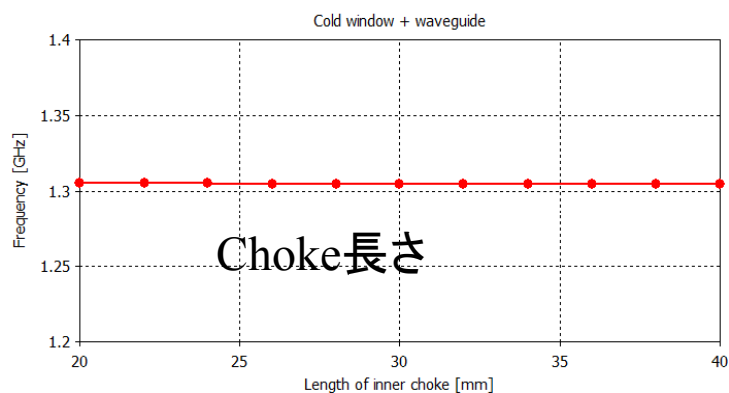
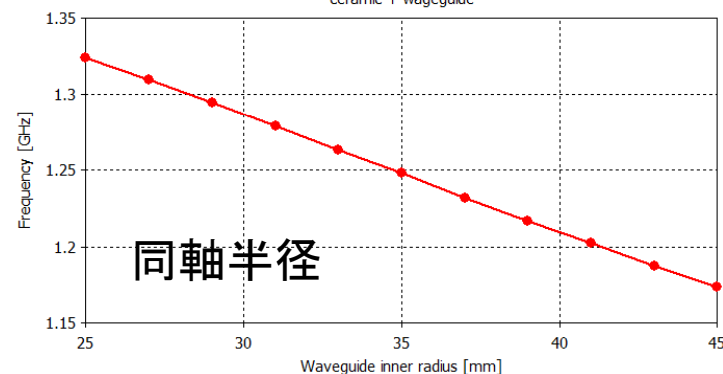
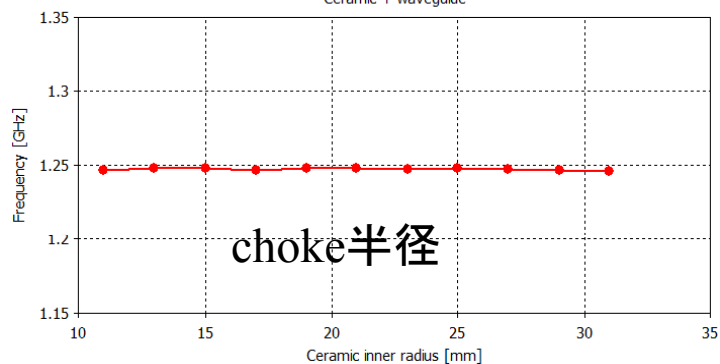
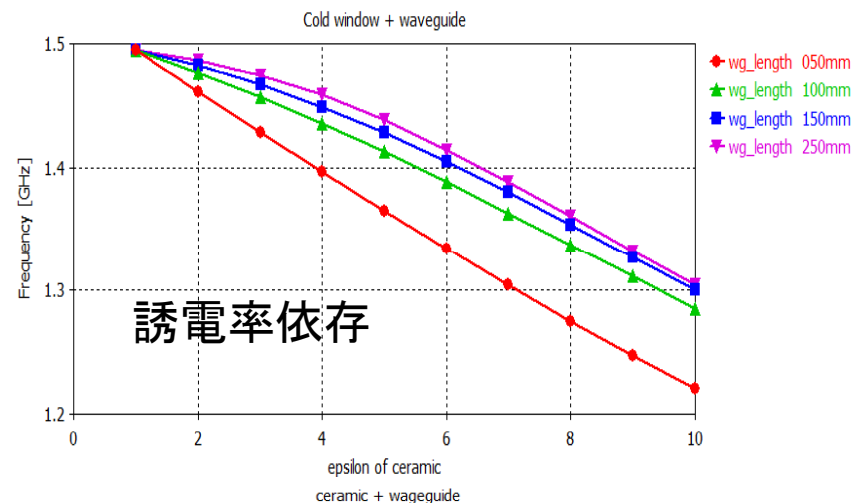
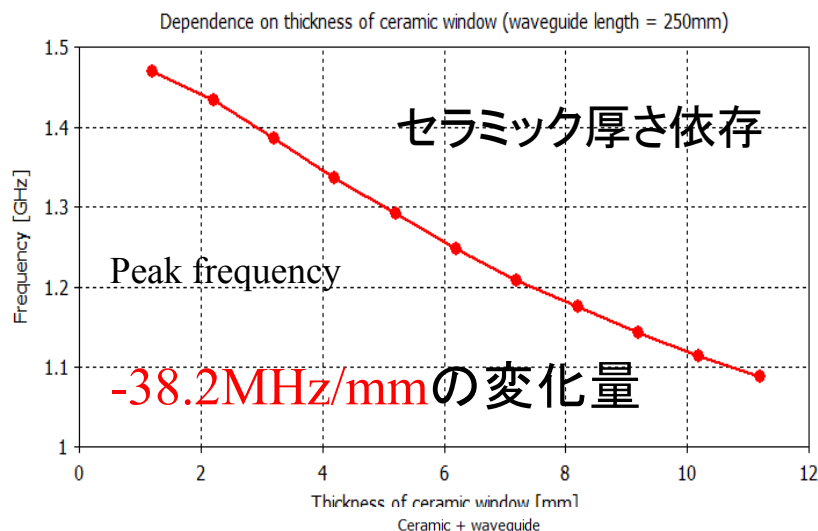
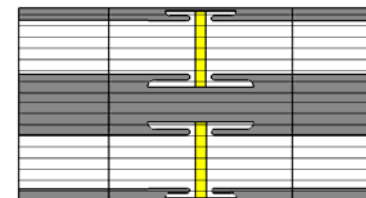
MW-Studio

同軸導波管の長さ $>200\text{mm}$ では周波数一定となる(境界条件によらなくなる)

この場合は、 1306MHz に収束 \rightarrow このモードがセラミック窓で共鳴をおこし、 1.3GHz に近づき、発熱を起こしたようだ。

How to escape from peak

Cold窓+同軸



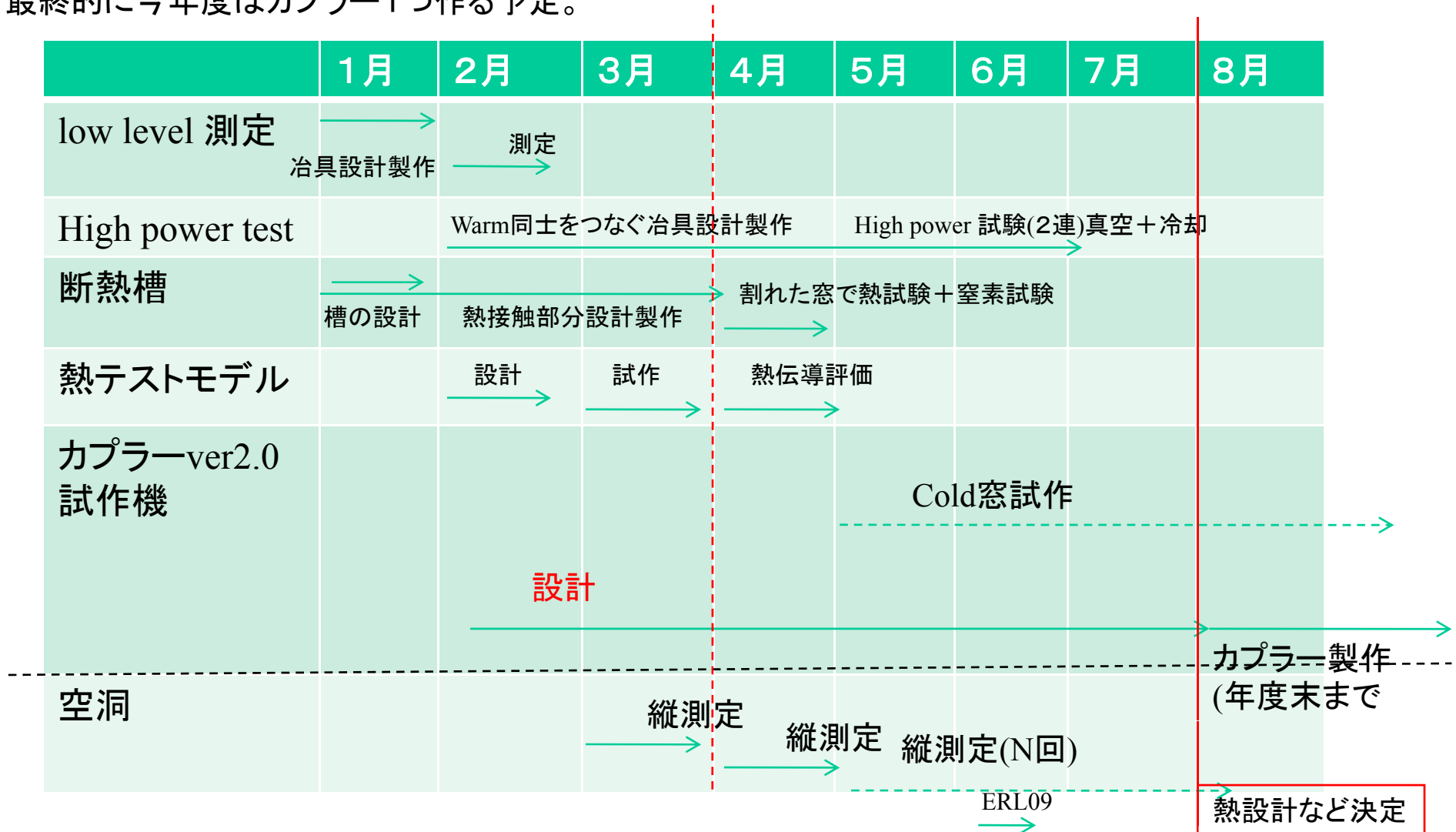
セラミック厚さ、誘電率、同軸導波管の径に依存。セラミック窓を厚くして peak を Escape することを検討する。

今まで行ったこと、わかったことと問題点

- Cold窓、warm窓、ベローズ作成に関して
 - HA997によるセラミック窓のロウ付けは外観上問題なく、リークもなかった。
 - Warm窓での内導体部のbellowsは銅メッキ後にロウ付けをおこなっても問題なし。但し、酸化をふせぐため、メッキはピロリン酸銅メッキが必要。
 - 組み立て時も特に機械的に問題がなく、真空リークもなかった。
 - Low level測定では3連状態ではS-paraは計算とおおむね良い一致を示していたが、1.305GHz付近に急峻なpeakが見られた。これは単体測定でもみられており、計算ではdipole modeと非常に良い一致をしめしていた。
- テストスタンドの構築およびhigh power測定
 - 3連+ドアノブの状態室温にて真空に引かずに20kWまでパワーを通した。
 - 内部のベローズの空冷により、1kW投入時では温度上昇は1/5程度に抑えられており、計算とも比較的良い一致をしめた。20kW投入時にはそれでも内導体のベローズの温度上昇は20度から110度まで ΔT で90度の温度上昇が見られた。開封後はベローズに特に問題となる傷あとなどはなかった。
 - Coldセラミック窓での予期せぬ急激な温度上昇が見られている。中を開け確認後、Coldセラミック窓だけ割れているのが、判明。熱的な膨張によるものと考えられており、low level測定時に見られたpeakが温度上昇とともに推移する傾向があり、このpeakの除去が緊急の課題である。

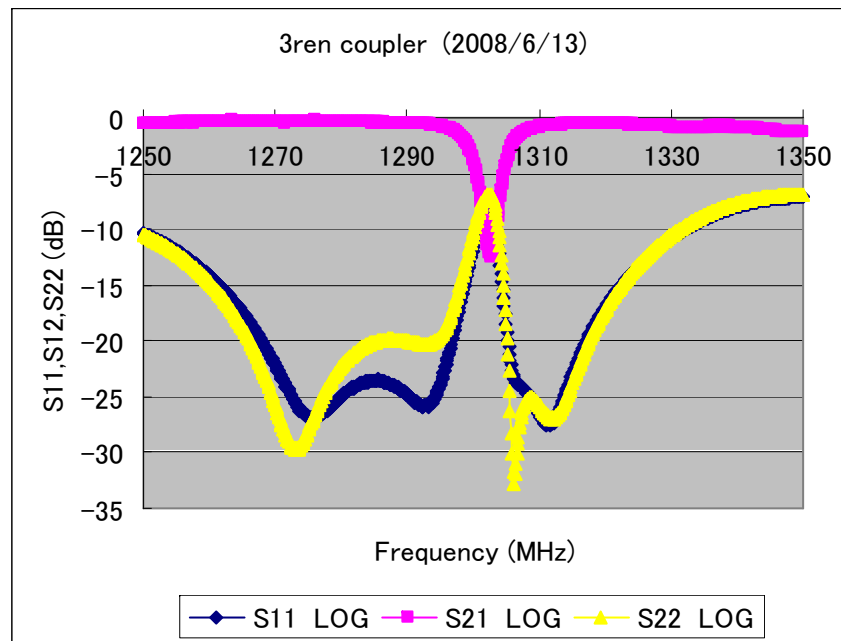
今後のスケジュール(カプラー関係+空洞)

- High power 測定: warm窓同士をつないで真空引いた後high power testを行う。(ベローズの評価)
- 断熱槽を用いて液体窒素を用いてCold窓の冷却テスト(80Kの熱伝導でどれだけ冷えるか?)を行う。
- Cold窓ver2の試作を行い、RF的に問題ないか、冷却など再度評価を行う。
- 最終的に今年度はカプラー1つ作る予定。

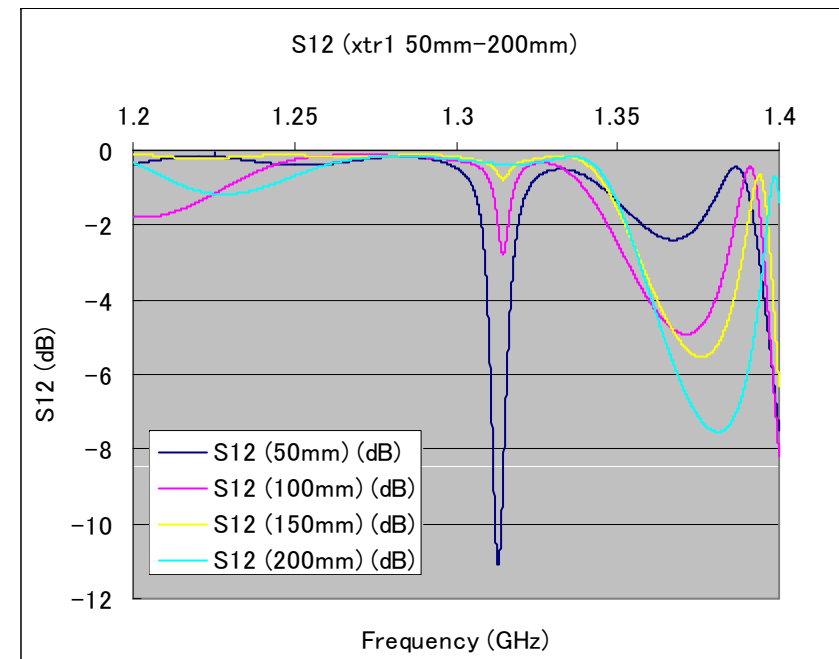


延長管の影響

- Simulationの結果powerが入らない原因がドアノブとセラミックの距離が近いためではないかとの疑いがあった。そのため、今回新たに延長治具を設け、simulationとおりにpeakがなくなり、1.3GHzのpowerが通るかどうかを確認する。



前回の測定 (2008/6/13)
セラミック窓3つにドアノブをつなげ測定したら、1.3GHz近くに共鳴のpeakが見られた。



HFSSによるsimulationの結果 (S12)
ドアノブとセラミック窓の距離を伸ばすとpeakがなくなっていくのがわかる