

## IOT の利得変動の経験とその対策

### EXPERIENCE OF GAIN DROP OF IOT AND ITS IMPROVEMENT

安 和彦<sup>#,A)</sup>, 石本 和也<sup>A)</sup>, 花香 宣彦<sup>A)</sup>, 沼田直人<sup>A)</sup>,  
明本 光生<sup>B)</sup>, 荒川 大<sup>B)</sup>, 竹中 たてる<sup>B)</sup>, 中島 啓光<sup>B)</sup>, 松本 利広<sup>B)</sup>, 三浦 孝子<sup>B)</sup>,  
道園 真一郎<sup>B)</sup>, Feng QIU<sup>B)</sup>,

Kazuhiko Yasu<sup>#,A)</sup>, Kazuya Ishimoto<sup>A)</sup>, Norihiko Hanaka<sup>A)</sup>, Naoto Numata<sup>A)</sup>,  
Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Dai Arakawa<sup>B)</sup>, Tateru Takenaka<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Takako Miura<sup>B)</sup>,  
Shinichiro Michizono<sup>B)</sup>, Feng QIU<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

We constructed RF test stand using the CPI 1.3GHz, 30kW CW Inductive output tube (IOT) for aging and equipment of the RF input coupler in KEK-cERL building. The IOT has not been used for about one year. When we had started the IOT operation again, the phenomenon that RF output-power fell suddenly had occurred. In particular, when once RF was turned off and turned on again, the output power always decreased 3dB approximately. If the gain reduction occurs once, the gain had not recovered on that day. But it recovered on the Next Day. We will report on the process of the cause investigation and the improvement of this phenomenon.

#### 1. はじめに

KEK の cERL 開発棟内において RF 入力カップラのエイジングや機器の試験用として 1.3GHz, 30kW CW 出力の CPI 社製の Inductive output tube (IOT) を用いて RF テストスタンドを構築した。IOT の原理的な構造は Figure 1[1]、CPI 社製の IOT の写真を Figure 2、仕様は Table 1 に示す。

この IOT は KEK の cERL 加速器における主空洞[2]の RF 源として導入されたが、現在は 8kW の半導体アンプに置き換えられ、一年間程使用していなかった。再度 IOT を運転することとなった為、動作試験を行ったところ、試験中に RF 出力が急落する現象が多発した。特に一度 RF が切られると、RF 再投入時は、必ず 3dB 程度の利得の低下が見られた。この現象が起こると、利得が再度回復することは無く、運転を停止した。翌日立ち上げ時には、利得が回復することが多かった。この現象の原因究明の過程や対策について報告する。

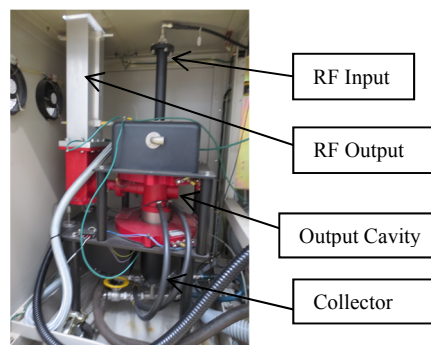


Figure 2: Photo of the CPI 30kW IOT(VKL-9130).

Table 1: Specification of IOT (VKL-9130)

name	Symbol	Value	Units
Beam Voltage	$E_b$	34	kV
Beam Current	$I_b$	1.39	A
Quiescent Current	$I_q$	0.030	A
Grid Voltage	$E_g$	-80	V
Grid Current	$I_g$	0	mA
Output Power	$P_o$	32	kW
Efficiency	$Eff$	64	%
Gain	dB	23.4	dB
Bandwidth(-1dB)	BW	3.5	MHz

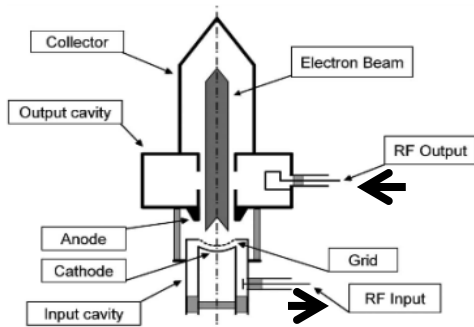


Figure 1: Theoretical structure of The IOT [1].

<sup>#</sup> nat-yasu@post.kek.jp

## 2. 動作試験のセットアップ

IOT 出力直後に方向性結合器(方結)を付け、末端にウォーターロードを装着して、パワーを吸収させた。

方結はネットワークアナライザを使用して結合度を測定してから組み込んだ。

Figure 3,4 のように方結から順方向(Pf)・反射方向(Pb)の RF 信号を取り込み Divider で二分岐にしてパワーメーター(PM)と VSWR メーターでモニタリングした。

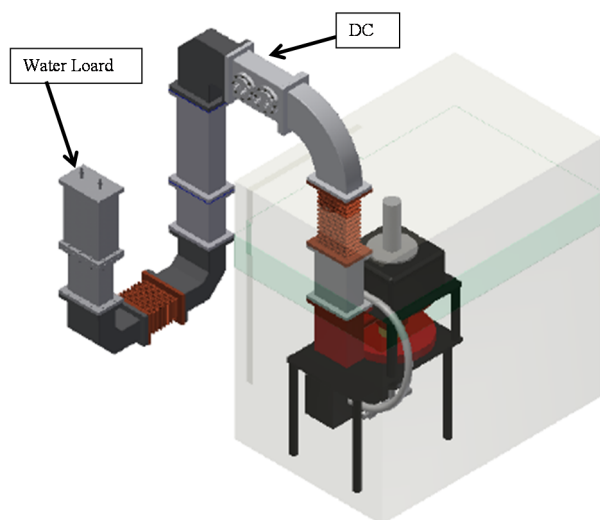


Figure 3: Layout of IOT test.

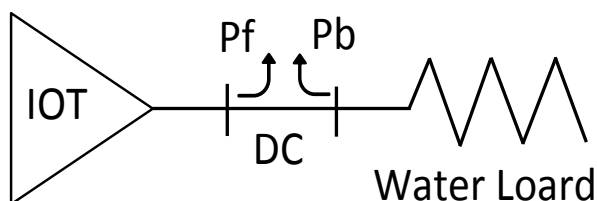


Figure 4: Diagram of IOT test.

## 3. 利得低下の現象

試験の目的は 30kW まで出力することである。徐々に出力を上げていき 30kW 出力時に安定した運転を維持する計画で試験を行った。

0kW 付近から 5kW ずつ出力を上げていく途中、20kW 時に突如 RF の出力が半分程度に低下した。利得は 23dB 程度あったが再度立上げて試験を再開したところ、立ち上げ時より 3dB 低下した。その日の試験は、利得低下のままであった。その後、エイジング効果を期待して数日間エイジングを行うこととした。Figure 5,6 に数日間エイジングを行った結果を示す。おおむね試験の途中で利得が低下するのだが、日によっては朝の立ち上げ時から利得が低い日もあった。

利得の違いは、二つのカーブにしか乗らないため、何か不連続な変動と考えられた。エイジングによる利得の改善は見られなかった。

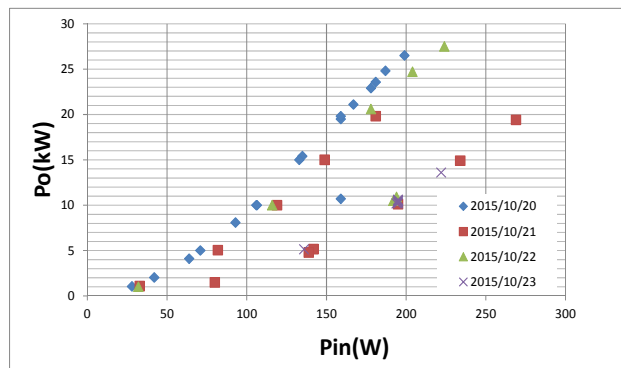


Figure 5: The measured output power vs. input power.

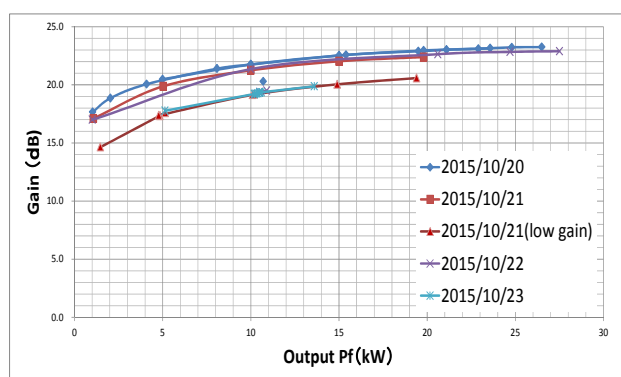


Figure 6: Gain vs. output power.

### 3.1. サーモカメラによる観測

Figure 7 は RF 出力に対する内部の温度上昇の画像である。撮影箇所は Figure 2 を参照。

異常発熱箇所がないかを確認する為、サーモカメラを使用し内部を撮影したところ、目立った異常箇所はみられなかった。同じ入力パワーに対し、通常利得時(30kW 出力時)の最大温度は 44.5°C、低利得時(16kW 出力時)では 38.6°Cで、出力に依存した温度上昇が観測された。

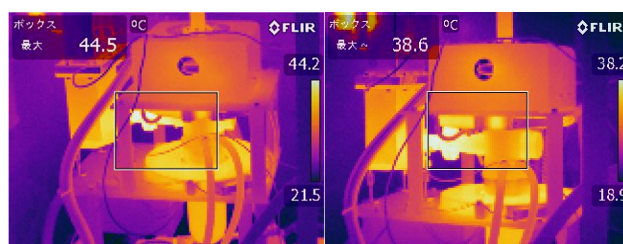


Figure 7: Thermal image of IOT.

### 3.2. 共振周波数の確認

異常時でも、高電圧、グリッド電流、ヒーター電流は変化しておらず、共振周波数がずれている可能性もあるため 1299.8~1301.4MHz までの入力 RF の周波数をふって出力パワーの確認をおこなった。Figure 8 にその結果を示す。出力はほぼフラットで、共振周波数に問題がないことがわかった。ちなみに、RF 入力側の反射パワーも測定しており、それにも問題はなかった。

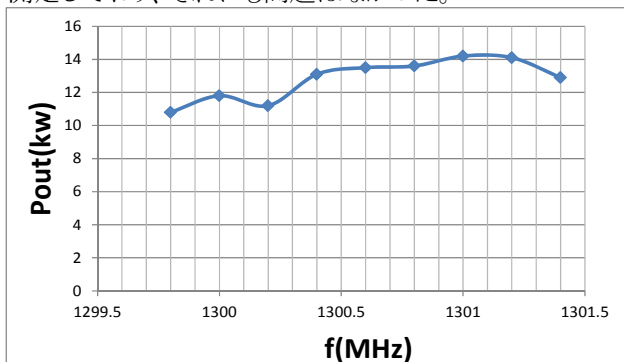


Figure 8: RF output due to the resonance frequency.

## 4. 故障箇所の究明

今回の現象について IOT のメーカーである CPI 社に問い合わせを行ったところ、入力側/出力側のどちらにも問題があるのか区別するため、利得の変動前後でビーム電流の値を測定し、異なる場合は入力側の問題、ビーム電流に変化がなければ出力側の問題であると指摘を受けた。

その指摘を受け、再度運転を行い通常利得と低利得時のビーム電流並びにビーム電圧についてもデータを測定ところビーム電流値に変化が見られた。

そのため入力側に問題があると判断した。その際の値を Table 2 に示す。

Table 2: The Difference of Beam Current

	Beam Voltage	Beam Current
Normal Gain	34.2 kV	1.17 A
Low Gain	34.2 kV	0.82 A

### 4.1. 零入力電流(待機電流)値の確認

入力側に問題があることがわかり CPI 社から下記の(a)~(d)の指摘を受けた。

- (a): 利得変動前後の零入力電流は同じか？
- (b): (a)が違う場合、カソードとグリッドの隙間間隔がドリフトしていることを意味する。電子銃周りのエアフローを確認すること。
- (c): (a)が同じ場合は、周波数チューニングが必要。
- (d): (c)のチューニングでビーム電流が変わらない場合は、カソードの問題。真空計の読みが通常利得と低利得で同じか？

まず(a)の利得変動前後の零入力電流を測定した。

Table 3: The Difference of Zero Input Current

	Normal Gain	Low Gain
Zero Input Current	0.05A	0.1A

Table 3 にあるように通常利得時と低利得時の電流値に違いが見られた。このため、(b)にあるようにカソード・グリッド間の距離が変化していると判断し、エアフローを確認したが正常に働いていた。グリッド電流の通常利得と低利得時の値も確認したが違いはなかった。

### 4.2. フィラメント温度による影響

CPI 社からカソード・グリッド間の距離の変化の原因は、熱の影響で距離が変化しているのではないかと指摘を受けた。

Table 4: Set Point of Filament Power

	Current	Voltage	Power
KEK	8.5A	10.5V	89.25W
CPI	8.1A	9.1V	73.7W

Table 4 はフィラメントパワーの KEK と CPI 社の設定値の比較を示す。表を見ると運転時のパワーが CPI 社より高いことがわかる。そのため余分なパワーがカソードとグリッドの間隔に影響していると考え、フィラメントパワーを CPI 社の設定に合わせて運転してみることにした。

IOT 電源内部にあるスイッチを操作してフィラメント周辺の電圧・電流値を Table 5 のように変更し運転を行った。その結果、出力が低下することはなくなった。ヒーター周りの熱量が緩和され、カソード・グリッド間の距離が正常になったと思われる。

その後3日間出力試験をおこなったが、出力が途中で低下する現象はみられなくなり、安定に出力(Fig. 9)が出るようになった。

Table 5: The Difference of Input Current to Output

	Current	Voltage	Power
Before	8.5 A	10.5 V	89.25W
After	8A	9.9 V	79.2W

## 5. まとめ

今回、IOT 長期保管後の RF 出力試験を行ったところ利得の低下という現象が起き、原因調査を行った。ヒーターによる異常発熱箇所の調査や、エイジング運転による改善、共振周波数のずれ等、様々な要因を考えて確認作業を行ったが、改善はみられなかった。その経緯をふまえ CPI 社と何度もやりとりし、カソード・グリッド間に余分な熱量がかかっていることが原因と判明した。ヒーター電流を下げることで、安定に出力が出るようになった。

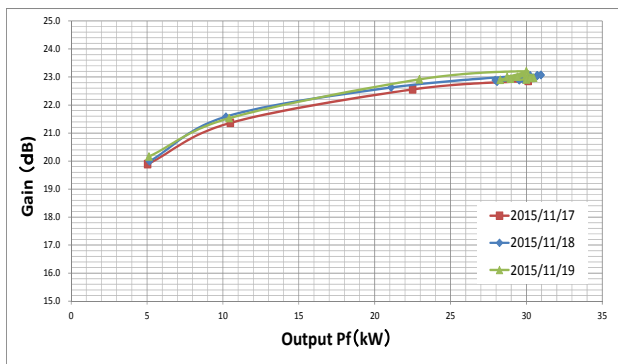


Figure 9: Gain curve of the IOT for three days.

## 参考文献

- [1] Richard G. Carter Simple Model of an Inductive Output Tube IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 57, NO. 3, MARCH 2010.
- [2] 阪井寛志, 他, “Compact ERL 主加速部超伝導空洞クライオモジュールハイパワー試験”, Proceedings of the 10th PASJ, Nagoya, Aug. 3-5, 2013 MOOT09.