

DEVELOPMENT OF THE 1.2 MW CYLINDRICAL-TYPE HIGH POWER WATER-LOAD FOR SUPER KEKB

渡邊謙^{#,A)}, 海老原清一^{A)}, 可部農志^{A)}, 西脇みちる^{A)}, 川根祐輔^{B)}, 三浦厚^{B)},
 Ken Watanabe^{#,A)}, Kiyokazu Ebihara^{A)}, Atsushi Kabe^{A)}, Michiru Nishiwaki^{A)}, Yusuke Kawane^{B)}, Atsushi Miura^{B)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} Nihon Koshuha Co. Ltd

Abstract

We have developed and manufactured CW 1.2 MW high power water-load for SuperKEKB, an electron-positron double-ring collider at KEK. As a water-tank of the load, a cylindrical type chooses to reduce a surface current and to shorten a length of the load. A tap water has been used to absorb the rf high power.

New water-loads will be installed at D4 and D5 in the high power rf stations of the main ring. The rf window and the water-tank were made of Al₂O₃ ceramics and SUS304. The operational frequency is 508.9 MHz. Four water-loads (include one proto-type model) were fabricated until March 2013, and tested in July 2013 at D2-ET test station with a high power klystron (1.1 MW, YK1303). The result of the high power test will be reported in this paper.

1.2MW CW 大電力用ウォーターロードの開発

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では現在 SuperKEKB 加速器の建設が行われている[1]。主リングに蓄積されるビーム電流は各々電子 2.6A、陽電子 3.6A と、これまでの KEKB 加速器に比べて 2 倍以上大きくなり、それに対応するため、高周波源の増強を行っている。SuperKEKB 加速器で使用されるクライストロンは Toshiba E3732 (CW 1.2 MW)、運転周波数は 508.9MHz であり、運転時にクライストロンから供給される最大電力は 850 kW である。今回述べる大電力用ウォーターロードは主に空洞の反射からクライストロンを保護することを目的として用いられ、後述するようにクライストロン 1 台から空洞 1 台に電力を供給するステーション (1 対 1) にはサーキュレーターの第 3 ポートにウォーターロードが設置される。クライストロン 1 台から空洞 2 台に供給するステーション (1 対 2) には、Magic-T を用いて空洞へ供給する電力を 2 分岐するため、Magic-T の第 4 ポートにウォーターロードが設置される [2]。

今回開発した大電力用ウォーターロード (NKC: WDL-R06WC) は高周波窓にディスクタイプのアルミナセラミックス、水タンク部に 1.5m の円形導波管型を採用したものである。これにより既存の矩形導波管型 (NKC: WDL-R066D、水タンク長 2.5m) [3] と比べ、高周波窓近傍の局所的発熱の抑制、圧力損失の低減による全揚程の改善がなされ、高性能化が期待される。この円形導波管型は現在高周波源の増強を行っている大穂地区 (D4、D5) の RF ステーションのすべてに組み込まれる予定であり、2013 年度までに 12 台を製作する。最終的には計 14 台を製作する予定である。今回報告する大電力試験の結果はその内 2012 年度に製作されたプロトタイプ 1 台[4]を含む計 4 台についてである。また、ウオー

ターロードの運転に用いる冷却水循環装置の建設も現在行っている。

矩形導波管型については開発が行われた 1998 年～2007 年までの間に計 19 台製作され、富士地区 (D7、D8)、日光地区 (D10、D11) の各 RF ステーションに組み込まれ KEKB 加速器の運転に使用されてきた。これらは SuperKEKB 加速器でも引き続き使用する。

本報告では新規に開発した円形導波管型大電力用ウォーターロードの大電力試験の結果と現在建設中の冷却水循環装置について報告する。



図 1: 円形導波管型ウォーターロードの外観

2. ウォーターロードの構成

ウォーターロードの仕様を表 1 にサーキュレーター第 3 ポートに設置したウォーターロードの外観を図 1 に示す。図 2 は円形導波管型と矩形導波管型実機である。図 3 にクライストロンと空洞が 1 対 1 並びに 1 対 2 のステーションの RF システム構成を示す。ウォーターロードの構成と電磁界分布を図 4

(a)、(b)に示す。計算は HFSS ver 12.0 で行った。ウォーターロードは主に 3 つのパーツで構成され、それぞれ入力導波管 (WR-1500、アルミ製、大気)、アルミナ製高周波窓および SUS304 製円筒型水タンクである。この円筒型水タンクは円形導波管として機能する。高周波窓は冷却水タンクと立体回路を物理的に絶縁するために用いており、マイクロ波のみを透過させ、入射する大電力を市水に直接吸収させる構造である。シールには金属ヘリコ (メッキ有り) を使用している。なお、マイクロ波吸収体には誘電正接の温度依存性の観点から市水(水温 20~70°C の変化に対して、誘電率 69~83、誘電正接 0.04~0.046 となる)を用いる[5]。純水の場合、水温の上昇に伴い、誘電正接が小さくなる特性を持ち 60°C で 0.015 となるため、大電力を対象とした吸収体には向かない。



図 2 : 円形導波管型 (上)、矩形導波管型 (下)

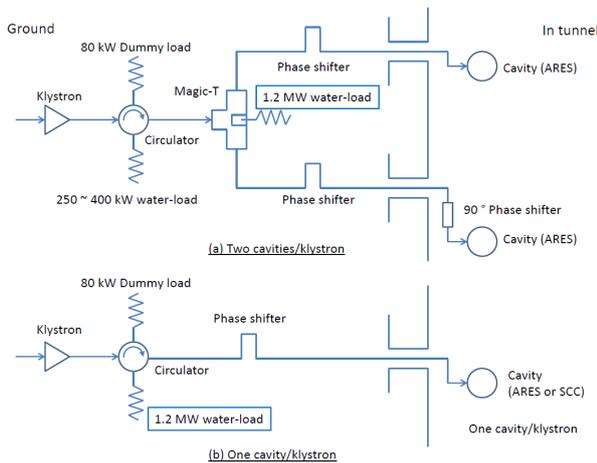


図 3 : RF システムの構成

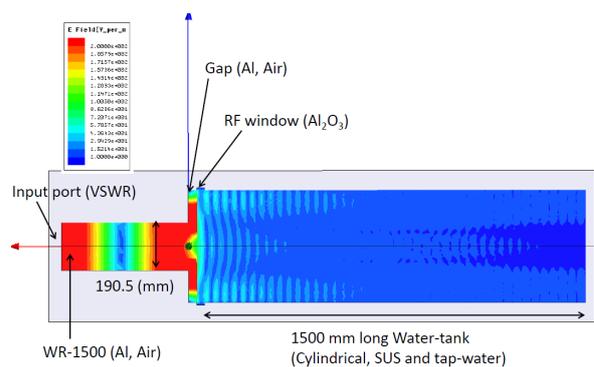
水タンク内の伝播モードは以下のようになる。矩形導波管内の伝播モードは矩形 TE_{10} であり、水タンク直前にある Gap によりモードコンバートされ、水タンク内では円形 TM_{11} モードとなる。また、高周波窓近傍の最大表面電流は 1.2MW 入力で 600A/m であり、既存の矩形導波管型の 2400A/m に対して約 1/4 に低減されることが計算より見積もられた。

図 5 は吸収体を市水および純水とした場合における VSWR 特性の計算と低電力試験の測定結果である。市水では計算と測定結果が良い一致を示してお

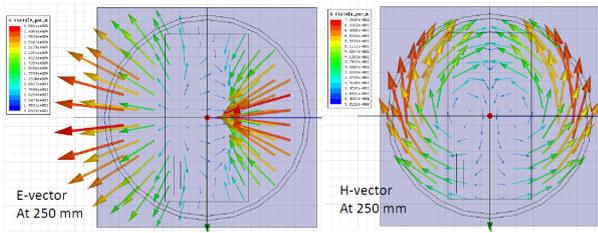
り、実機のピーク周波数は 40°C の水温で 505.4MHz (VSWR=1.03)、508.9MHz に対しては VSWR=1.05 であった。バンド幅は VSWR<1.1 の条件で ±10MHz、VSWR<1.2 で ±19MHz と 508.9MHz に対して十分に広い帯域を持っていることが分かる。矩形導波管型のバンド幅は VSWR<1.1 ±7MHz であり、それ比較して広帯域であった。一方、純水を用いた場合、誘電正接が小さいため、十分なリターンロスが得られず、かつ周波数 (波長) に対して周期的な変化が見られた。純水を吸収体として使用する場合は、少なくとも 3m 長の水タンクが必要である。

表 1 : 円形導波管型ウォーターロードの仕様

Operational frequency	508.9±5 MHz
Maximum power	1.2 MW (CW) 2.2 MW (Pulse, < 1 ms)
Input VSWR (20~60 °C)	<1.1 (508.9±2 MHz) <1.2 (508.9±5 MHz)
Cooling water (Absorber)	Tap water
Water flow	<700 l/min
Water pressure	<10 kgf/cm ² (1 MPa)
Attenuation in water-tank	>12dB/m
Temperature of inlet water	<30±5 °C
Temperature of outlet water	<70 °C
Power leakage	<40 dBμV/m (<1 mV/m)
Input waveguide	WR-1500



a) Calculation model with E-field (1.2MW input)



b) E-field (left) and H-field (right) distribution on the cross section at 25 mm away from the rf window
 図 4：ウォーターロードの構成と電磁界分布

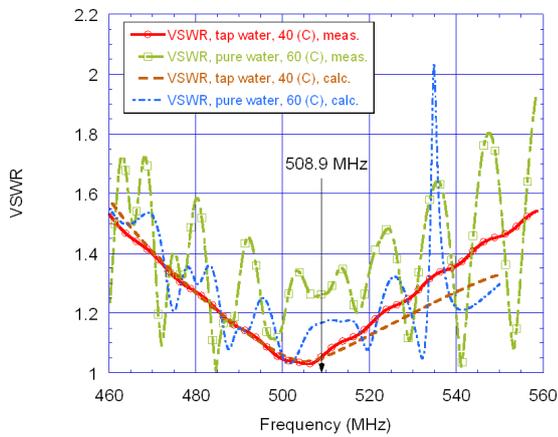


図 5：円形導波管型のブロードバンド特性

ウォーターロード内の水流の様子と擬似熱負荷を用いた熱流体解析の計算結果の一例を図 6、7 に示す。計算には Solid Works Flow simulation を用いた。また、水タンクのモックアップ（アクリル製）を製作し、実測と計算結果に差がないことを確認した。圧力損失は円形導波管型で $\Delta P=7400$ Pa、矩形導波管型で $\Delta P=13700$ Pa と計算より見積もられた。擬似負荷を用いた熱流体解析では主に高周波窓近傍の冷却効率を評価するために行っている。現状では、高周波窓近くの水タンクの形状を工夫することで電気的特性の劣化なしで冷却効率を向上させることができることまで分かっているが、実機へのフィードバックには至っていない。水タンク形状の最適化については今後の検討課題である。

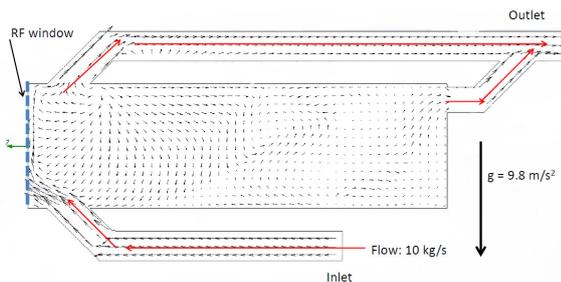


図 6：水流の様子

3. 大電力試験

3.1 セットアップ

大電力試験のセットアップを図 8 に示す。試験は 2012 年 10 月および 2013 年 7 月に D2-ET テストステーションで実施した。使用したクライストロンは YK1303(1.1MW output power, made by Valvo)である。

ウォーターロードへ供給する冷却水はバッファータンクへ貯水した市水をインバーター制御されたポンプユニットで供給する。流量は 400~600 l/min の間で調整可能な構成としている。投入電力(Pf)および反射電力(Pb)の測定にはウォーターロード直前に設置した方向性結合器とパワーメーターを用いた。吸収された電力の評価は冷却水の入と出の温度差を用いた。ロード表面に設置した温度センサー数（熱電対 T 型）は計 30ch であり、図 11 に大電力投入時の表面温度分布と共に設置位置を示す。アークセンサーは高周波窓が直接見える位置に設置し、RF インターロックの一つとした。初めの一機は慎重に試験を行い、10 時間をかけて 900kW まで投入電力を上げた。2 台目以降は約 5 分間隔で 50kW ステップでパワーを上げた。10kW からスタートし、2 時間で約 900kW まで投入した。なお、今回実施した 4 台の大電力試験では、異常な発熱やシールからの水漏れおよびセラミック窓表面の放電は観測されず、無事試験を終了した。冷却水配管および高周波窓のシール面からの電波漏れについては、900 kW 入力にて検出されなかった。

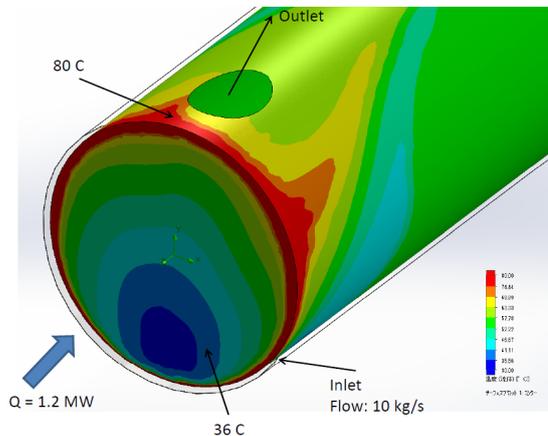


図 7：擬似熱負荷を用いた冷却効率の評価

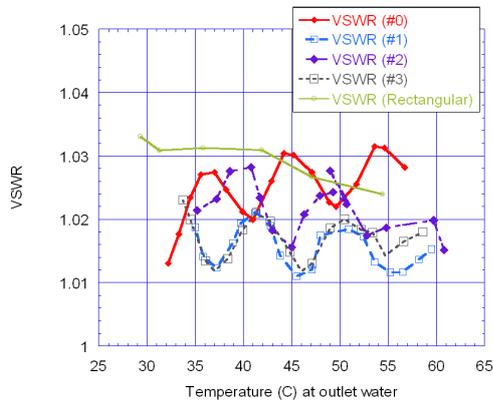


図 10 : VSWR の水温依存性

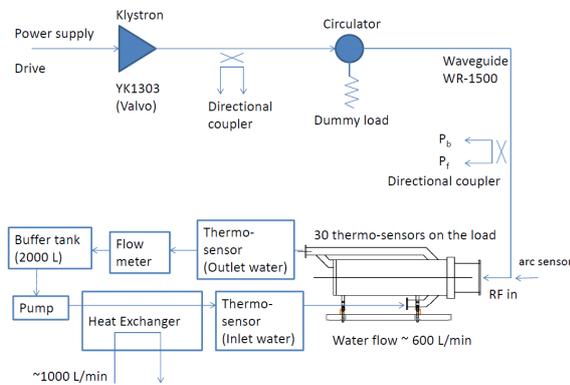


図 8 大電力試験セットアップ

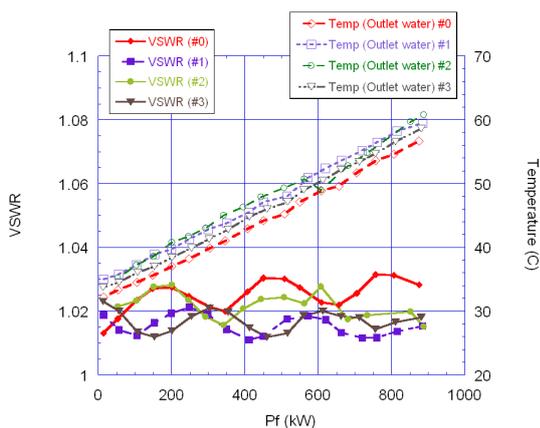


図 9 : 各パワーレベルにおける VSWR の変化

3.2 VSWR の水温依存性

大電力試験中に測定した各パワーレベルにおける VSWR の変化を図 9 に示す。図 10 は水温依存性にプロットし直したものであり、矩形導波管型のデータも併記した。測定時の冷却水の流量は 550~560 l/min であった。円形導波管型では、水温の変化

(誘電率の変化) に対して、508.9MHz に対する VSWR は周期的に変化した。このような変化は見られたが、水温 30~60℃ の変化に対し、VSWR は 1.04 以下を保っており、仕様の範囲内であった。また、ロードごとに周期的変化のピーク位置、オフセットおよび傾きに違いが見られた。#1 と #3 についてはほぼ同じ特性を示した。一方、矩形導波管型では水温の上昇に伴って直線的な変化でマッチングが良くなるという特性を持っており、形状の違いによる特性の変化がはっきりと現れた。

3.3 表面温度の分布

各パワーレベルにおけるロード表面温度の測定結果を図 11、12 に示す。ロードへの投入電力約 900 kW、冷却水流量約 550 l/min の時の値である。円形導波管型と矩形導波管型を比較すると、双方ともに高周波窓近傍および窓から約 300~400mm 離れた位置の表面温度が一番高い傾向が見られた。Outlet water とロード本体の表面温度の温度差は最大で円形導波管型で 7.9℃、矩形導波管型で 20.8℃あった。高周波窓近傍の温度を比較すると、最大値は円形導波管型で 57.6℃、矩形導波管型で 73.5℃であり、15℃以上の違いがあった。高周波窓および水タンクの構造を変えたことで局所的発熱が抑制されたことがこの結果から分かる。

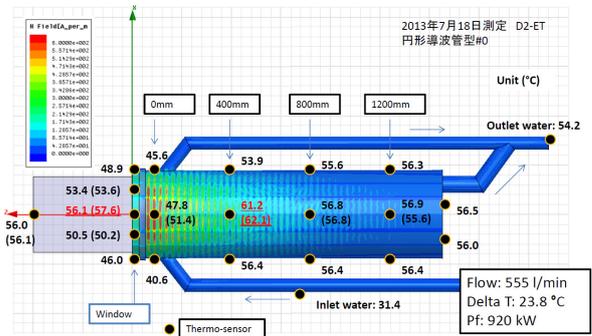


図 11 : 円形導波管型の表面温度分布

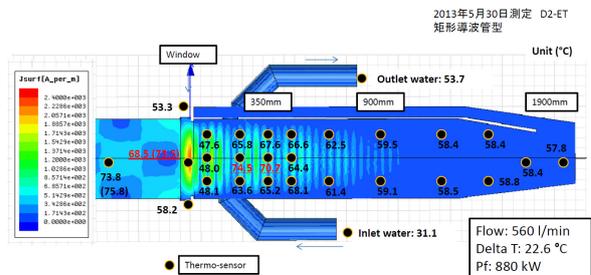


図 12 : 矩形導波管型の表面温度分布

4. 冷却水循環装置

大電力用ウォーターロードの動作に用いる冷却水循環装置について述べる。SuperKEKB 加速器主リ

ングで想定される ARES 空洞の場合の熱負荷は以下の通りである。運転中の最大の熱負荷は空洞エージング時における空洞からの反射電力であり、これは入力カップラーの結合度に依存する。この結合度はクライストロンあたりの運転空洞数に依存し、1 対 1 の場合、176 kW の定常的な反射、1 対 2 の場合、計 80 kW の反射がある[6]。空洞エージング時のクライストロンあたりの出力は 1 対 1 で約 300 kW、1 対 2 で約 350 kW となる。空洞トリップ時には瞬間的に熱負荷が増大する。

図 13 は SuperKEKB 運転開始時における大徳地区 D4、D5 の RF システムの構成である。T=0 の時点では 1 対 1 および 1 対 2 のシステムが混在している状況であり、各棟の最大熱負荷はそれぞれ 864 kW (D4)、1056 kW (D5) である。運転開始後に実施する高周波源の増強後には全て 1 対 1 になり、D4 では 1408 kW に増加する。

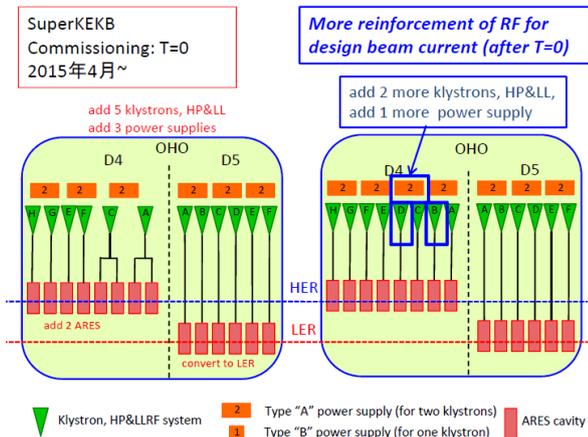


図 13：大徳地区の RF システムの構成

図 14 に D4 における大電力用ウォーターロードの冷却水循環装置の概要を示す。図中に示す水温は各ロードへの熱負荷が 200 kW の場合における値である。冷却水循環装置は閉回路の構造を取っており、バッファタンクへ貯水した市水を 15 kW(全揚程：約 43m)のポンプ 2 台を用いて負荷側へ供給する。電源棟内に設置される RF ステーションは全長約 80 m の建屋全体に分散して設置される。ウォーターロードもまた同様に分散して設置されるため、冷却水配管は全体で 200 m を超える。動力ポンプの仕様を決めるために熱流体解析から求めたウォーターロード単体の揚程と Hardy-Cross 法など負荷側の全揚程の値を見積り、約 34m の値が得られた。負荷側の配管の構成は 4 並列 2 直列としており、2400 l/min の冷却水を各系統へ 4 分岐する (D5 は 3 並列 2 直列であり、1800 l/min となる)。熱交換器は十分に余裕を持たせ D4 で 2.5 MW(D5 では 1.9 MW)のものを採用した。冷却用の 1 次側の冷却水 (~3600 l/min) は施設機械棟から供給される。各系統への流量が 600 l/min、熱負荷が 200kW の場合、ウォーターロードあたりの冷却水の温度差は約 5°C

となり、各系統 2 直列としていることから、バッファタンクへの戻る冷却水の温度差は約 10°C となり、Inlet water の水温が 35°C の場合、45°C で選んでくる見積りである。

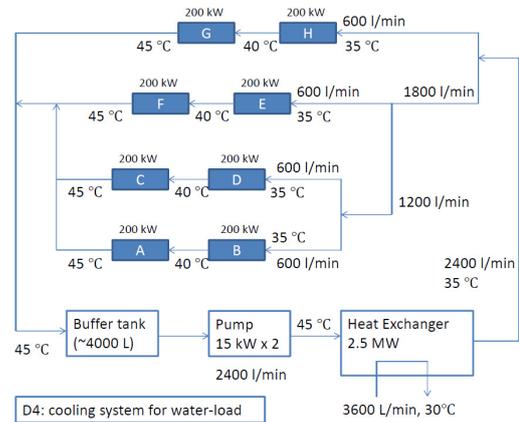


図 14：冷却水循環装置の概要

5. まとめ

- 本報告では 2012 年度までに開発・製造した円形導波管型大電力用ウォーターロードの大電力試験の結果および現在製作中の冷却水循環装置について述べた。
- VSWR の水温依存性については 30~60°C の水温に対し、1.04 以下を示しており、仕様を満たした。また、既存の矩形導波管型と比較して局所的な発熱が抑制されたことが確認された。
- 大電力試験中、ロード表面に異常な発熱、放電は観測されず、4 台すべて試験をパスした。
- 運転開始時までに必要な残り 8 台は 2013 年度に製作する。これらについても大電力試験で性能を確かめた後、立体回路へ組み込む考えである。
- 水タンクの形状の最適化については、今後検討を続けていき、実機へフィードバックさせる考えである。

参考文献

- [1] SuperKEKB, URL: <http://www-superkekb.kek.jp>
- [2] K. Akai, "RF system for SuperKEKB", proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug 2010, WESH05 (in Japanese).
- [3] Y. Arizumi et al., "Development of 1.2 MW High Power Water Load", proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, Japan, 1999.
- [4] K. Watanabe et al., THPFI013, proceedings of IPAC13, Shanghai, China, 2013.
- [5] K. Ebihara et al., "RF High Power Water-Load for KEKB", proceedings of the APAC01, Beijing, China, 2001.
- [6] T. Kageyama et al., "ARES CAVITY SYSTEM FOR SuperKEKB", proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug 2011, TUPS126 (in Japanese).