

## HIGH POWER TEST OF THE PROTOTYPE CRYOMODULE FOR ADS SUPERCONDUCTING LINAC

Eiji Kako<sup>1,A)</sup>, Shuichi Noguchi<sup>A)</sup>, Norihito Ohuchi<sup>A)</sup>, Toshio Shishido<sup>A)</sup>, Kiyosumi Tsuchiya<sup>A)</sup>, Nobuo Akaoka<sup>B)</sup>,  
Etsuji Chishiro<sup>B)</sup>, Toshihiko Hori<sup>B)</sup>, Hideki Kobayashi<sup>B)</sup>, Norihiro Nakata<sup>B)</sup>, Nobuo Ouchi<sup>B)</sup>, Masayoshi Yamazaki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, JAPAN

<sup>B)</sup> JAERI, Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195, JAPAN

### Abstract

A prototype cryomodule containing two 9-cell superconducting cavities of  $\beta=0.725$  and  $f_0=972\text{MHz}$  had been constructed under the collaboration of Japan Atomic Energy Research Institute and High Energy Accelerator Research Organization on the development of superconducting LINAC for Accelerator Driven System (ADS). Cool-down tests to 2K of the cryomodule and high power rf tests with a 972MHz pulsed klystron have been carried out. Rf power of 350kW in pulsed operation of 3msec and 25Hz was transferred to a nine-cell cavity through an input coupler. Accelerating gradients of 14MV/m higher than the specification of 10MV/m have been achieved in both cavities. Compensation of Lorentz-force detuning by a piezo tuner was successfully demonstrated.

## ADS超伝導リニアック用クライオモジュールの大電力試験

### 1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の建設が、2007年の運転開始を目指して日本原子力研究所で進行中である[1]。その中で181MeV常伝導リニアックは、2006年の完成予定であり、ADS(加速器駆動核変換システム)実験施設に供給される600MeV陽子ビーム加速用超伝導リニアックについては第2期計画として位置づけられている。そのADS用超伝導リニアックの研究開発が、原研と高エネ研との共同研究により進められている。超伝導リニアックの基本構成要素となる9セル超伝導加速空洞2台を内蔵したプロトタイプのクライオモジュールが建設され[2]、完成後その冷却試験が行われた。ここでは、972MHzパルスクライストロン[3]を用いた大電力での高加速電界発生実験の結果について報告をする。

### 2. クライオモジュール

このクライオモジュールは、 $\beta=0.725$ (陽子ビームエネルギーとして424MeV相当)で設計されており、972MHz9セルニオブ空洞2台(R空洞およびL空洞)が内部に収容されている。ニオブ空洞の外側は、チタン製の液体ヘリウム容器で覆われており、液体ヘリウムを減圧することにより超流動状態の2Kまで冷却される。設計値として、ビーム電流30mA、パルス幅3ミリ秒で25Hzの繰

り返し運転を想定している。加速電界は、10MV/mでQ値 $10^{10}$ 以上を目標としており、このとき高周波入力結合器の外部Q値 $5 \times 10^5$ の設定で300kWの高周波電力が空洞に供給される。空洞の共振周波数の調整機構として、ステッピングモーターとピエゾ素子から構成されるチューナーが真空槽端板の外側に取り付けられている。

クライオモジュールの大電力試験用設備の写真を図1に示す。放射線遮蔽用コンクリート壁内部に、クライオモジュールとパルスボックスが設置され、外部より大電力高周波システムや液体ヘリウム供給システムと接続されている。



図1：クライオモジュールの大電力試験用設備

<sup>1</sup> E-mail: eiji.kako@kek.jp

### 3. 超伝導空洞の高電界性能

高周波入力結合器は、テストスタンドで1 MWまでのエージング[4]を行った後、クライオモジュールへ取り付けられた。その後、120°Cで40時間のベーキングを行い、冷却前の室温時にパルス幅3ミリ秒で25 Hzの繰り返し運転で350 kWまでのエージングを行った。

高加速電界発生実験は、まず4.2Kにおいて開始された。R空洞およびL空洞とも、約9 MV/mの加速電界において最初のクエンチが観測された。その後、短パルスエージング(0.6ミリ秒)を行うことにより、最終的に14 MV/mの加速電界が両空洞について達成された。さらに加速電界を上昇させることは、電界放出電子による著しいX線量の増加のために、制限された。2.1Kへの冷却後の高加速電界発生実験においては、図2に示されているように目標値である10 MV/mを超える12 MV/mでの安定なパルス運転が両空洞において確認された。これらの実験において大電力高周波システムは、位相・振幅のフィードバック制御なしで運転された。

25 Hzの繰り返し運転における液体ヘリウムの蒸発量の計測による空洞のQ値の測定が行われ、その結果を図3に示す。実線は、残留抵抗値10nΩを想定したときの理論的計算値から推定された。2.1Kでの実線と測定値の差は、電界放出電子による熱負荷の増加と考えられる。

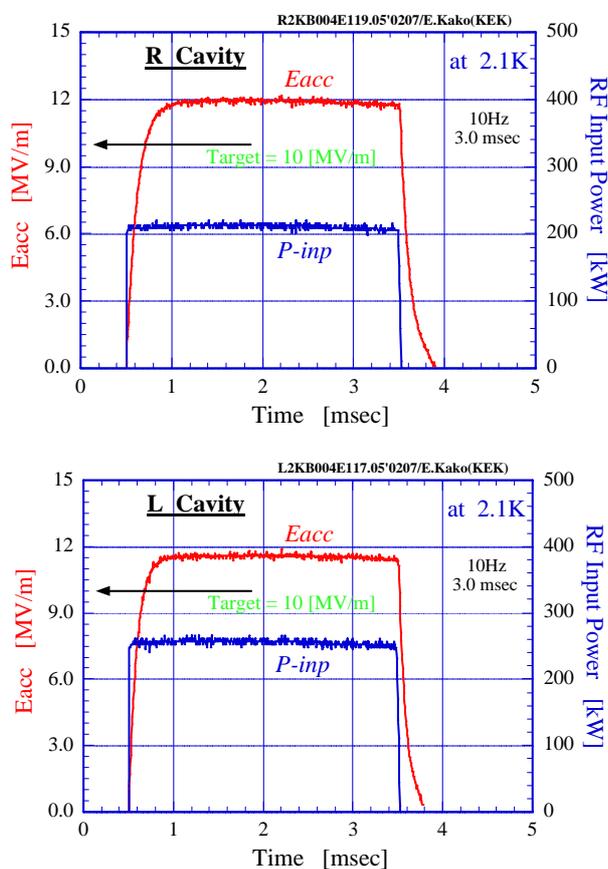


図2：達成された加速電界のパルス波形

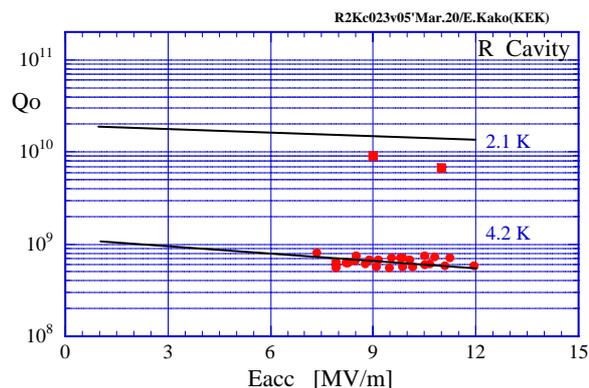


図3：2.1K および 4.2K におけるQ値の測定結果

### 4. パルス運転による空洞の変形

パルス運転における加速高周波電磁界は、発生するローレンツ力によって超伝導空洞の変形を引き起こし、空洞共振周波数に加速電界の二乗に比例した量のズレを与える。図4・上にR空洞が12 MV/mで運転されているパルス波形、図4・下にその時の空洞の位相変化およびピエゾによって検出された空洞長変形を示す。観測された位相変化は、 $-6.5^\circ$ であり、空洞のバンド幅3 kHzから空洞共振周波数の変化として $-175$  Hzに相当する。この周波数変化が加速電界へ与える影響は、わずか0.6%の低下あり、そのパルス波形(Eacc)には明らかな変化が見られない。

ローレンツ力による空洞長の变形( $\Delta L$ )および周波数変化( $\Delta f$ )の加速電界強度依存性の測定が行われ、

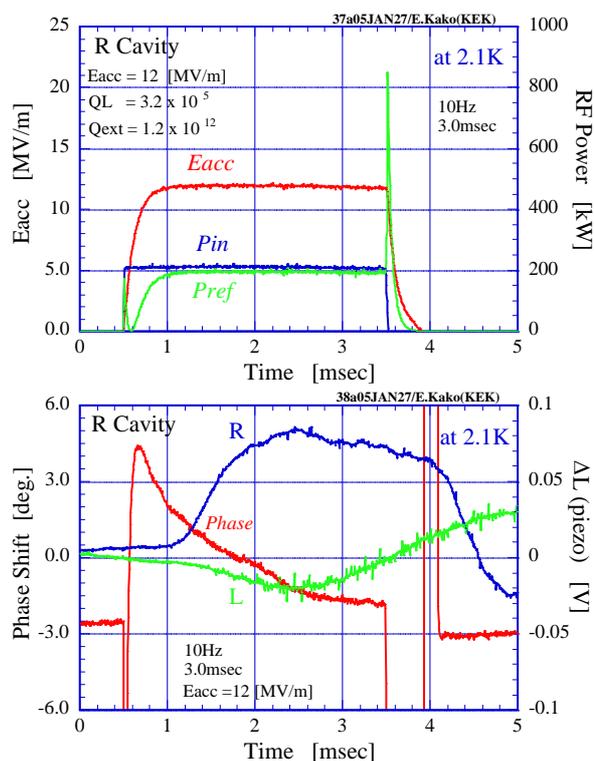


図4：高周波パルス波形(上)、位相変化および空洞長変形(下)

その結果が図5に示されている。加速電界の二乗に対するプロットより  $\Delta f [\text{Hz}] = -1.2 * E_{acc}^2 [(\text{MV}/\text{m})^2]$  の関係式が得られた。この係数は、モデル計算の結果 (-1.3) と矛盾しない値であった。

ピエゾチューナーにパルス電圧を印加することにより空洞の全長を数ミクロン程度変化させることができる。10MV/mでのローレンツ力によって誘起される位相変化が、ピエゾへの印加電圧により抑制されている様子を図6に示す。ピエゾチューナーから空洞への機械的応答特性がそれ程速くないため、パルス初期の位相変化に対しては効果が見られない。また、数kHzの速い成分を持つシングルセルモードがパルス初期の空洞変形に主に寄与していると考えられる。

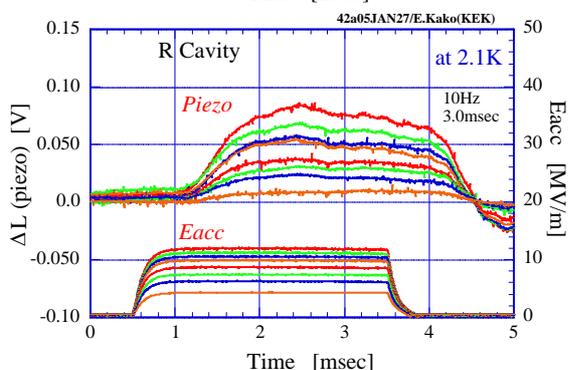
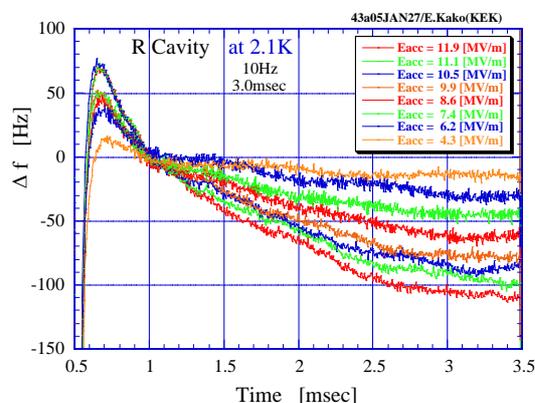


図5：ローレンツ力による周波数変化および空洞長変形の加速電界強度依存性

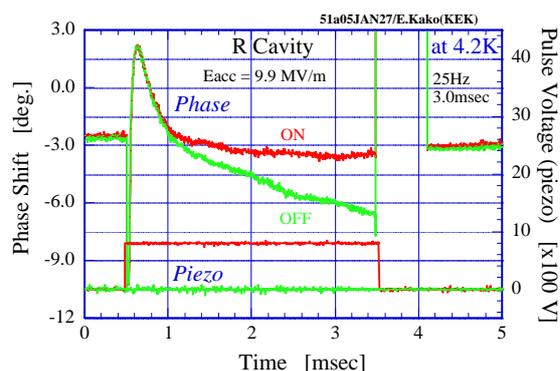


図6：ピエゾによるローレンツ力補償の実験

## 5. パルス運転による振動モード

繰り返される高周波パルスに起因する超伝導空洞の機械的振動モードは、図7に示されているようにチューナー機構に組み込まれているピエゾ素子により検出することができる。ここで、R空洞は10MV/mで運転されており、L空洞には高周波入力がない。最も顕著な振動モードの周波数は、シグナルのFFT解析により10Hz運転時には160Hzであり、25Hz運転時には150Hzであった。この周波数は、空洞変形による振動モードのモデル計算の結果から得られる2番目のマルチセルモード(169Hz)に近い値である。

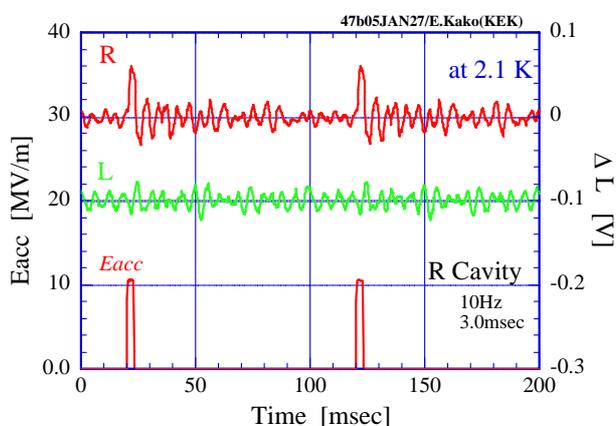


図7：10Hzでのパルス運転時の振動波形

## 6. まとめ

目標値を超える12MV/mの加速電界が2.1Kでのパルス運転において安定に達成された。パルス運転におけるローレンツ力による空洞変形・周波数変化の影響が調べられ、また、機械的振動モードの観測が行われた。

## 7. 謝辞

本研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業「加速器駆動核変換システムの技術開発等」の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] K. Hasegawa, "J-PARC Commissioning Results", Proceedings of the PAC2005, Knoxville, TN, USA, (2005) to be published.
- [2] S. Noguchi, et al., "Prototype Cryomodule for the ADS Linac", Proceedings of the SRF2003, Luebeck/Travemuende, Germany (2003) MoP032.
- [3] 堀利彦、他、「原研972MHzRFテストスタンドの現状2005」、第30回リニアック技術研究会プロシーディング、鳥栖市(2005)。
- [4] 加古永治、他、「J-PARC超伝導空洞用入力結合器の大電力試験」、第28回リニアック技術研究会プロシーディング、東海村(2003) p324。