

著者名：

液体キセノンガンマ線検出器の開発研究 - ポールシェラー研究所での μ 粒子稀崩壊モード探索にむけて -

三原 智[†], 道家 忠義^{*}, 春山 富義^{**}, 笠見 勝祐^{**}, 真木 晶弘^{**},
三橋 利也, 森 俊則, 西口 創, 大谷 航, 小曾根 健嗣,
澤田 龍, 鈴木 聡^{*}, 寺沢 和洋^{*}, 吉村 剛史^{*}

東京大学素粒子物理国際研究センター 東京都文京区本郷 7-3-1 ([†]E-mail:mihara@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

* 早稲田大学理工学総合研究センター 東京都新宿区早稲田 1-6-1

** 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 茨城県つくば市大穂 1-1

(2003年1月?日受理)

Development of a Liquid Xenon Photon Detector - Toward the Search for a Muon Rare Decay Mode at Paul Scherrer Institut -

Satoshi MIHARA[†], Tadayoshi DOKE^{*}, Tomiyoshi HARUYAMA^{**}, Katsuyu KASAMI^{**},
Akihiro MAKI^{**}, Toshiya MITSUHASHI, Toshinori MORI, Hajime NISHIGUCHI, Wataru OOTANI,
Kenji OZONE, Ryu SAWADA, Satoshi SUZUKI^{*}, Kazuhiro TERASAWA^{*} and Takefumi YOSHIMURA^{*}

International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

* Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 1-6-1 Waseda, Shinjuku-ku, Tokyo 113-0032

** High Energy Accelerator Research Organization, Institute of Particle and Nuclear Physics, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

(Received January ?, 2003)

Synopsis: We are developing a new type of photon detector for an experiment to search for muons decaying into a positron and gamma ray. In this experiment, the photon detector will utilize liquid xenon (Xe) as a scintillation material because of its fast response, large light yield, and high density. The scintillation light emitted in liquid Xe will be directly observed by photomultipliers (PMTs) located in the liquid without the use of a transmission window. In order to establish an operation technique and to study the detector response to gamma rays, we have constructed a prototype utilizing 100-liter liquid Xe. Current status and future prospect of the detector development will be reported in this article.

Keywords: Liquid Xenon • Photon Detector • Muon Rare Decay • Pulse Tube Refrigerator

1. はじめに

我々のグループでは μ 粒子の稀崩壊モード探索実験用の検出器として、液体キセノンを使用した新しいタイプのガンマ線検出器の開発を行っている。従来まで盛んに利用されてきた液体希ガス検出器は、放射線が検出器に入射した際に発せられる電離信号を液体中に配置した電極を通して読み出すという方式のもの

主であった。これに対して我々は、媒質としては液体キセノンを使用するが、入射粒子の計測を電離信号ではなくシンチレーション光により行う方式を採用した。これにより稀崩壊モード探索実験に不可欠な高速応答性を備えた検出器の製作が可能となった。検出器開発を進めるにあたっては、まずは2.3リットルの有感体積を持つ小型のプロトタイプを建設して動作原理の実証を行った¹⁾。その後、実機と同規模の検出器でも長

著者名：

期安定運転が可能であることを実証し、検出器性能の実証試験を行うために、100 リットルの液体キセノンを使用した大型プロトタイプを建設し、種々の試験を遂行してきている。

本稿ではこの大型プロトタイプを使用した検出器開発の現状を紹介するとともに今後の開発計画について報告する。

2. ポールシェラー研究所での μe 探索実験

検出器開発について言及する前に開発の動機となった μ 粒子稀崩壊モード探索実験について簡単にふれておこう。

我々が探索を行おうとしている崩壊モードは μ 粒子が電子とガンマ線とに二体崩壊するモード (μe 崩壊) である。このモードは崩壊の前後でレプトン世代数が保存していないために、ニュートリノの質量をゼロとする素粒子の標準理論の枠内では完全に禁止される。実際にはニュートリノには質量があるが、それでも標準理論の枠内では予想される分岐比は極度に小さく実験で直接探索できるレベルでは到底ありえない。しかしながら、超対称性粒子といった標準理論の枠組みを超えるような粒子の存在を仮定した場合、その分岐比は実験で十分観測にかかる程度にまで大きくなるのが様々な観点から指摘されており²⁻⁴⁾、この崩壊モードの発見は標準理論を超える新たな物理学の突破口となることはまちがいない。現在この崩壊モードに対しては 1.2×10^{-11} という上限値が得られているが⁵⁾、我々のグループはガンマ線の検出手法として液体キセノン検出器を導入することにより、これを数桁上回る感度で探索を行うことを目指している。

実験は世界最高度の μ 粒子強度を誇るスイス・ポールシェラー研究所 (PSI) で計画されている。実験計画書は 1999 年に提出され、既に採択を受けている⁶⁾。現在、日本、イタリア、スイス、ロシアからなる国際共同実験として実験の準備が進行中であり、各国が協力して各検出器コンポーネントの開発、建設を行っている。

3. 液体キセノンガンマ線検出器

アルゴン、クリプトン、キセノンといった液体希ガスを使用した放射線検出器は 70 年代半ば頃から活発な開発が行われ、様々な素粒子、原子核実験で利用されてきた^{7,8)}。液体を媒質として使用した場合、大立体角を覆う大型の検出器の建設にも容易に対処できると

いう利点がある。現在稼動中、または製作中の大型の液体希ガス検出器としては、液体アルゴンを使用したタイムプロジェクトチェンバー⁹⁾、液体クリプトンを使用した電磁カロリメーター¹⁰⁾、液体キセノンを使用した暗黒物質探索用検出器¹¹⁾などが挙げられる。

我々の液体キセノンガンマ線検出器はこれらの検出器とは違った信号読み出し方法を採用している。信号読み出しに液体キセノン中で発せられるシンチレーション光を使用する検出器は今までも開発されてきた。この点では我々の検出器も変わりはないが、液体キセノンの有感領域全体を囲むように、全ての壁面に微弱光を電気信号に変換する光電子増倍管を配置する点に特徴がある。しかも、光電子増倍管を液体キセノンに浸して使用する。これによりシンチレーション光の高速応答性を保持しつつ、透過窓を一切介さないことで十分な量のシンチレーション光を計測することができ、優れた検出器性能を期待できる。また、透過窓を持たないために低温容器製作上の困難も低減できる。

液体キセノンの物性を Table 1 に示す。キセノンの特徴は液相として保てる温度領域が極めて狭く、液体から固体になるときの潜熱がかなり小さいため、固体への相転移が比較的容易に生じてしまう。検出器運転中に万が一キセノンが固化した場合、キセノン中に浸されている光電子増倍管が損傷を受けることが懸念される。このためキセノンを液化、再凝縮する際には液体中の全領域で急激な温度変化が生じないように、安定な温度コントロールを実現することが極めて重要となる。

上述のように微弱なシンチレーション光を計測する光電子増倍管は液体キセノン中に配置される。この

Table 1 Property of liquid xenon.

Property	Unit	
Saturated temperature	T(K)	164.78
Saturated pressure	P(MPa)	0.100
Latent heat (for liquid)	ρ (J/kg) $\times 10^3$	95.8
Latent heat (for solid)	ρ' (J/kg) $\times 10^3$	1.2
Specific heat	C_p (J/kgK) $\times 10^3$	0.3484
Density	ρ (kg/m ³) $\times 10^3$	2.947
Thermal conductivity	κ (W/mK)	0.108
Viscosity	μ (Pa-s) $\times 10^{-4}$	5.08
Surface tension	σ (N/m) $\times 10^{-3}$	18.46
Expansion coefficient	β (1/K) $\times 10^{-3}$	2.43
Temperature/Pressure at triple point	T_t (K)/ P_t (MPa)	161.36/ 0.0815

著者名：

ため光電子増倍管は 160K 付近でも動作可能で、回路系からの発熱が極力少ないものであることが望ましい。さらには発せられるシンチレーション光は 174nm に波長のピーク値を持つ真空紫外光であるため⁸⁾光電子増倍管の入射窓はこの波長領域の光を透過させることができる必要がある。このような要求のもと、液体キセノン中での動作可能な石英入射窓を備えた光電子増倍管の開発が浜松ホトニクス社と共同で行われた。この光電子増倍管は光電面物質に低温で低効率の変化が小さい Rb-Cs-Sb を採用している。また、光電子増倍管の側管には金属管を使用してキセノン容器内での急激な圧力上昇にも耐えられるように強度を上げ(0.3MPa 耐圧)、メタルチャンネルダイノード構造を採用することによって全長を 32mm まで短くすることも成功している。

PSI での μe 崩壊探索実験では、極微の分岐比まで感度を高めるために高強度の μ 粒子ビームが必要なだけでなく、検出器も大立体角を覆うものが必要とされる。このため我々は 800 リットルの液体キセノン(重量にして約 2.4 トン)を使用したガンマ線検出器の製作を検討している。検出器がここまで大きくなると検出器中で伝播するシンチレーション光が光電子増倍管に到達するまでに吸収されないように注意を払わなければならない。液体キセノン中でのシンチレーション光の発光メカニズムは非可逆な反応であるため自己吸収は生じないことが知られている¹²⁾。したがって吸収が生じるとすれば検出器中に残留し液体中にもれ出てくる水分、酸素などの不純物に起因するものであることが予想され、検出器運転にあたってはこれらを除去することが重要となってくる。

このような運転条件を満足し、長期安定運転を行う上で必要となる技術の検証を実機に近い条件で行うために、液体キセノンガンマ線検出器の大型プロトタイプを建設し種々の試験を開始した。

4. 大型プロトタイプによる検出器開発研究

4.1 プロトタイプ概要

大型プロトタイプの外観図を Fig. 1 に示す。このプロトタイプは直方体のホルダーに装着された 228 本の光電子増倍管からなる光電子増倍管アレイ(Fig. 2)と、真空断熱層を備えた液体キセノン容器とから構成されている。ホルダーには光電子増倍管の校正を行うために²⁴¹Am アルファ線源が 4 個装着されている。検出器運転時には容器内部にキセノンを満たし、アレイ全体

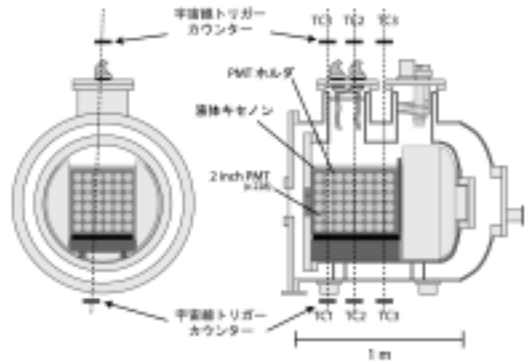


Fig. 1 Schematic view of the large prototype. Three sets of cosmic-ray trigger counters are also shown.

が液体キセノンに浸かるようになる。容器には、液化ならびに再凝縮を行うための液体窒素冷却パイプ、パルス管冷凍機が装着されており、上下には宇宙線が検出器を通過した際の応答を調べるため、3 組のプラスチックシンチレーションカウンターが配置されている。

冷凍機としてパルス管冷凍機を使用する利点は、冷却部分に機械的な稼働部分がないため周囲の測定器に対するノイズ源となりにくい、低温部に交換が必要な部品がないため長期安定運転に適している、また冷却に寒剤を使用しないため運転が安全で容易である、などの点があげられる。我々のグループでは液体キセノン温度での使用をターゲットにしたパルス管冷凍機の開発も行っており¹³⁾、2.2kW のコンプレッサーを使用して 65W の冷却能力を得ている。

検出器の運転中には次に挙げるような熱の流入、発熱が生じる。光電子増倍管の電圧供給回路に装着され

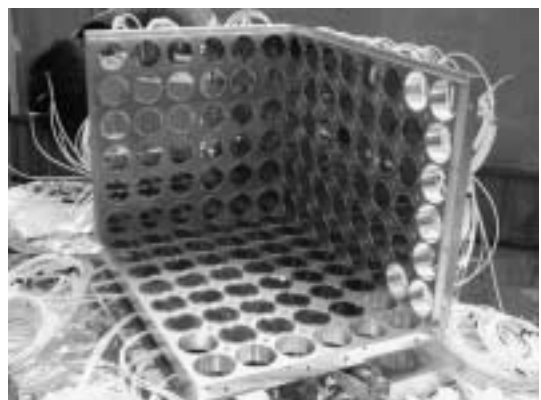


Fig. 2 Construction of the photomultiplier(PMT) array which consists of 228 PMTs installed in the cooling chamber.

著者名：

ている抵抗からの発熱、電圧 - 信号ケーブル(長さ 3m, 合計 456 本の同軸ケーブル)を通じての熱流入, 内部容器を支えるサポートならびにサービサポートからの熱伝導と真空断熱層内の放射によるものである。最初の 2 つについては, 印加電圧と抵抗値, ならびにケーブル断面積からおのおの 18W, 10W と見積もられている。最後の熱伝導と放射による熱の流入については, 液体キセノンの蒸発量測定および冷凍機の余剰冷凍能力から 24W と見積もられており, 設計上の値とほぼ同等の値に抑えられている。

液体キセノン中に多数の PMT が浸漬されているため, 抵抗等の発熱体から液体へどのような熱伝達が行われるか知ることも重要である。核沸騰により気泡が発生し, 光信号を乱すことも考えられる。この点を明らかにするため, 液体キセノンの沸騰熱伝達特性を調べる実験を行った¹⁴⁾。実験結果によると, 大型プロトタイプ容器内で起こっている PMT の抵抗からの発熱は熱流束が小さいため, 自然対流により冷却されており, 光信号の測定に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

4.2 運転手順

ここで検出器の運転の手順を, 実際の試験を行うときの手順に従って説明しよう。

検出器の運転を行うにあたっては, あらかじめ真空ポンプにより容器内部を排気した後, キセノンガスを室温で 0.2MPa まで封じ込め, 液体窒素および冷凍機により検出器内部が 165K 近くになるまで約 24 時間冷却する(予冷)。この後キセノンを常時供給し続けながら液体窒素, 冷凍機によりキセノンの液化を行い 2 日間かけて必要量の液体キセノンを蓄える(液化)。液化が終了した時点で冷凍機による定常運転モードへと移行するが, この際, 冷凍機コールドヘッド温度が一定(164-165K)になるようにコールドヘッド部に装着されているヒーターにより制御を行う。これにより光電子増倍管の運転にも何ら支障をきたさない安定な液体保持が達成できている。また, 何らかの理由により急激な圧力上昇が生じた場合(0.13MPa 以上)には液体窒素を強制的に流し, 危険を回避する機能が備えられている。さらに, いかなる場合でも容器内圧が 0.25MPa 以上にならないように安全弁が設けられている。

キセノンを容器内に供給する際には, 必ず希ガスの用ゲッター純化装置を通して, ガス中に含まれる水分, 酸素, 炭化水素などの除去を行っている。先にも述べた通り, とりわけ水分の混入が生じた場合, シンチレ

ーション光の吸収が大きくなり, 検出器性能が十分に発揮されない恐れがある。このため液体キセノン中に含まれる水分量を ppm 以下のレベルまで落とすことが重要となる。通常水分除去に最も効果的な方法は容器ならびに内容物の温度を上げベーキングを行うことであるが, 我々の検出器は内部に光電子増倍管が設置されているため 70 以上の高温にすることができない。このため後ほど述べるように液化が終了した後にキセノンを循環させ, 再度, 純化装置を通過させることにより検出器内部に残留する不純物の除去を行っている。

運転終了後には液体キセノンを貯蔵タンク(内容積 285 リットル)に回収する。回収は貯蔵タンクを液体窒素で冷却することにより行う。同時に検出器容器内のキセノンの蒸発を促すため, 冷凍機を停止し, 真空断熱層内に窒素ガスを注入するとともに, 検出器下部に装着されているヒーターを熱する。回収にはおおよそ 2 日間を要し, その後 3 日間かけて常温まで検出器全体の昇温を行う。

現在までに 1 ヶ月以上に渡る長期運転も繰り返し行われており, パルス管冷凍機により 100 リットルの液体キセノンを安定に保持できることは実証済みである。また, 全体のシステムは完全に密閉されており, 一連の検出器運転に際しては高価なキセノンガスをほとんど損失することなしに運転を行うことに成功している。

4.3 キセノンの純化と性能評価試験

液化を終了した後に実施されているキセノンの純化が, 現在どのように行われているのかを説明しておこう。また, 純化により検出器の応答がどのように向上していくかについても述べる。

必要量の液体キセノンを液化した後, 直ちに測定を開始しても, 液体キセノン中に残存していると思われる水分(あるいは酸素)がシンチレーション光を吸収するため, 十分な検出器性能が得られない。実際, 液化を開始する前の容器内部の状態にもよるが, 液化を終了した直後には, 観測される宇宙線イベントの光量はシミュレーションから予想される量の 1/4 以下であったこともある。この場合の宇宙線の入射位置の違いによる測定される光量の分布は, 液体キセノンのシンチレーション光の波長分布と水分子による光の吸収断面積から計算される分布でよく再現されており, 液体中に残存している 10ppm 程度の水分が吸収の原因となっていたと考えられる。検出器容器に注入するキセ

著者名：

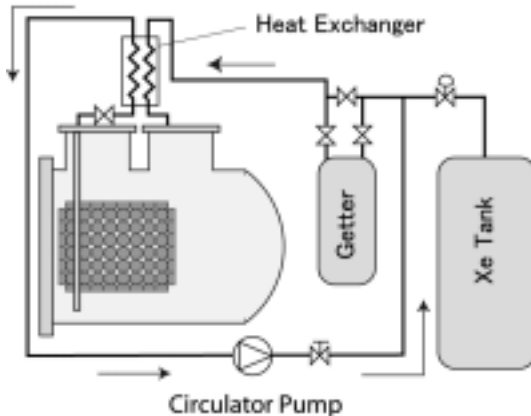


Fig. 3 Circulation scheme of xenon for purification in the large prototype.

ノンは必ず純化装置を通してから液化を行っているため、水などの不純物がキセノン中にもともと含まれていたとは考えにくく、やはり真空ポンプにより排気されずに容器内部に付着していたままの水分が液体キセノンで満たされた後、液体中にしみ出してきているものと推測している。

このような不純物の除去を行うため、Fig. 3 に示すような循環システムを導入し液化後のキセノンの純化を行った。図に示されているようにキセノンは容器下部から吸い上げられ、純化の後、容器上部より戻される。容器の下の方から吸い上げられたキセノンは温度が上昇して直ちに蒸発するが、その際の気化熱を利用して熱交換器により純化の後再び容器に戻ってくるキセノンの冷却を行っている。キセノンを循環させるためには、最大吐出流量 25 ガスリットル/分、最大吐出圧力 150kPa のダイヤフラムポンプが使用されており、循環流量はポンプ近くのバルブによりコントロールされ液体換算で約 10cc/分のキセノンが循環されている。熱交換器がどの程度効率的に純化後のガスを冷却できているかを評価することは難しいが、この流量で循環を行った場合、純化装置を通して常温にまで温度が上昇したキセノンを再度液化するには 55W の冷却能力が余分に必要であることが計算により求められる。この値はパルス管冷凍機を持つ余剰冷凍能力を大きく上回っている。このため循環純化中には容器内の圧力上昇を抑え、蓄えられた液体を安定に保つために、液体窒素による冷却も並行して行っている。

一定の流量で純化を行い容器内部からの不純物の湧き出しがないと仮定すると、純化により液体中の不

純物の量はキセノンの全体積と循環速度から決まる時定数 τ で減少していくはずである。また、不純物による光の吸収長は、不純物濃度に反比例するため同じ時定数で増加していくはずである。この結果、液体キセノン中で光源から一定距離 d にある場所でシンチレーション光を観測しつづけた場合、純化開始からの時間 t に応じて光量は、

$$N(d, t) = N_{\infty, d} \exp\left(-\frac{d}{\lambda_0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (1)$$

のように増大し、最大値 $N_{\infty, d}$ へと漸近していく。ここで λ_0 は純化開始直後の光の吸収長である。

純化を続けるにしたがって、宇宙線イベント、アルファ粒子イベントに対して光量が増大していく様子を Fig. 4 に示す。各々、純化を開始した直後の光量を基準としてそこから増大具合を 300 時間経過後まで示してある。それぞれの光量の変化に対して、時定数を求めると、どちらも 3% の精度で 350 時間程度とお互い一致した結果が得られた。この後、さらに 300 時間の純化を行った後にアルファ粒子イベントを用いて液体キセノン中でのシンチレーション光の吸収長を見積もると、95% 以上の信頼度で下限値として 100cm という値が得られた。この値は μe 実験を遂行する上での最低限の要求を満たしている。また、この減衰長は液体キセノン中の不純物の混入度として、水分換算でおおよそ 100ppb 以下に対応することがシミュレーションにより判明している。

5. 今後の予定

現在までに行ってきた開発研究により 100 リットルの液体キセノンの液化、長期安定保持は何ら問題なく行えることが実証された。また、キセノンを循環させ

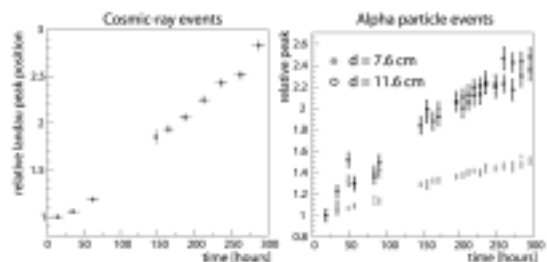


Fig. 4 Change in light yield for cosmic-ray events (left). Change in light yield for alpha events, observed by PMTs located at 7.6 and 11.6cm from the alpha sources, is also shown (right).

著者名：

ることにより液体中の不純物の除去も可能となり検出器性能が十分引き出せることも判明した。

今後は、大型プロトタイプで得られた知見をもとに μe 探索実験用の実機製作を開始する。なお実機（800 リットル，PMT1000 本）では 165K における熱負荷は 130W 程度と見込まれている。現在，この熱負荷に対応した大容量パルス管冷凍機の製作も進められている。

また，純化の効率を上げるため，気相で行っている純化を液相で行うことも検討している。具体的には低温液体用ポンプを用いて液体キセノンを蒸発させることなく循環させ，モレキュラーシーブを通すことにより液体キセノン中に含まれる水分の除去を行う。この方法が成功すれば循環できるキセノンの量は飛躍的に向上する。このため今までの方法では 1 ヶ月弱を要していた純化時間が大幅に短縮でき，実機（大型プロトタイプの約 8 倍の液体キセノンを使用）の運転開始時の立ち上げに要する時間も大幅短縮が可能となることが期待される。

液相純化装置の開発にあたっては，まずは小型のテストチャンバーを用いて液相循環装置の試験を行い，個々の部品の信頼性をチェックし純化性能の評価を行った後に，大型プロトタイプや実機検出器への装備を行っていく予定である。

本研究を遂行するにあたっては多くの方々のお力，協力，支援をいただいた。日大の松原洋一教授にはパルス管冷凍機設計，製作に際して，設計用シミュレーションプログラムの貸与および有意義なコメントをい

ただいた。高エネルギー加速器研究機構カウンターホール実験室係ならびに低温グループには，実験場所をはじめ，液体窒素の供給など開発研究を遂行する上で数多くの支援をいただいた。この場をかりてお礼申し上げます。

なお，本研究は科学研究費補助金 - 特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」中の計画研究「レプトンフレーバーを破るミュー粒子崩壊の研究」の一環として行われている。

参 考 文 献

- 1) S. Mihara, et al.: IEEE TNS **49** (2002) 588
- 2) R. Barbieri and L. J. Hall: Phys. Lett. **B338** (1994) 212
- 3) R. Barbieri, et al.: Nucl. Phys. **B445** (1995)219
- 4) J. Hisano and D. Nomura: Phys. Rev. **D59** (1999) 116005 and references therein
- 5) M. L. Brooks, et al.: Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 1521
- 6) T. Mori, et al.: Research Proposal to PSI, R-99.05.1, May 1999
- 7) D. Schinzel: Nucl. Instr. and Meth. **A419** (1998) 217
- 8) T. Doke and K. Masuda: Nucl. Instr. and Meth. **A420** (1999) 62
- 9) F. Cavanna: NOON2000, Proc.of the Conference, World Scientific (2001), 122
- 10) M. Jeitler: Nucl. Instr. and Meth. **A478** (2002) 404
- 11) 鈴木聡：日本物理学会誌 **53** (1997) 181
- 12) T. Doke: Port. Phys. **12** (1981) 9
- 13) T. Haruyama, et al.: KEK Preprint 2002-102
- 14) T. Haruyama: Adv. Cryog. Eng. **47B** (2002) 1499