

INTERNAL TARGET についてのコメント

I L Cの多角的活用を考える会@KEKつくば

平成29年11月22日

KEK物構研ミュオン 牧村俊助（代理：河村）

(shunsuke.makimura@kek.jp)

はじめに

ILC多角的活用の検討を始めたところ、関係者がMuon Colliderの可能性に関して盛り上がり始めた。Internal Targetを考える。

概念設計の前段階の実現可能性の粗計算を開始。論文や現在、稼働している装置のスケールから議論を行う。

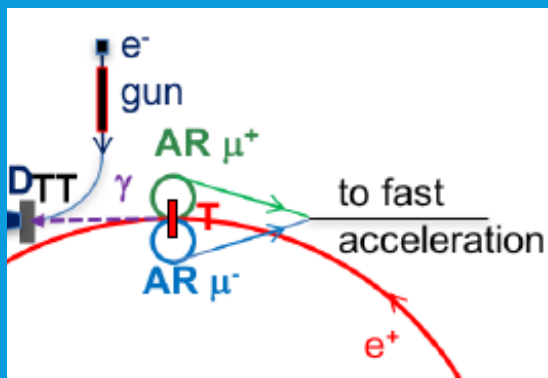
ロマンを追い求める。（都合の悪い課題には目をつぶる。）

1. M. Boscolo, "STUDIES OF A SCHEME FOR LOWEMITTANCE MUON BEAM PRODUCTION FROM POSITRONS ON TARGET" Proceedings of IPAC2017, p2486-2489
2. P. Satyamurthy, "Design of an 18MW vortex flow water beam dump for 500GeV electrons/positrons of an international linear collider", NIM A679(2012)67-81
3. 牧村俊助、「回転標的レビュー報告書および発表資料」KEK Proceeding 2014-5
 - 1では、Muon Colliderのための理想的なビーム径を検討している。マルチターンによって、0.5 mm径程度のe+ビームを想定している。（45 GeV, 240mA, 500 MHz）
 - 2では、ILCのビームダンプの評価からILCでのInternal Targetのビームロス等を推測
 - 3では、J-PARC回転標的の設計をサマリしている

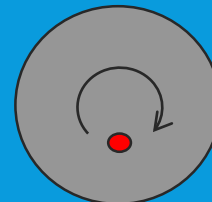
基礎知識・仮定・コメント

- ILC_DUMPではBeam Rasteringによって発熱を分散すると同時に密度が低く流動する水をダンプとして採用。容器の窓材は 64Ti
- J-PARC_Muon標的では黒鉛製の回転標的方式によって発熱を分散。
- ILC_Muon Colliderでは、Beryllium 1 cm がInternal Target候補として挙げられている。ILC_DUMPのビーム窓を比較対象とする。

	ILC Dump	J-PARC Muon
粒子	(陽)電子	陽子
E	500 GeV	3 GeV
Beam 強度	18 MW	1 MW
材質	64Ti /水	黒鉛
方式	Rastering	回転

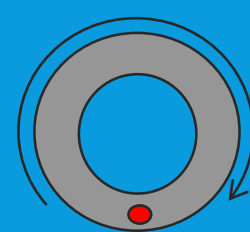


- Internal Targetは真空内
- HEミュオンだから、軸方向には分割できる
- ミュオン取り出し系の寸法制限は無視



- 電気的な光学系
- 回転速度は速い
- 回転半径は小さい

高い発熱密度を受けられる。



- 機械的な回転系
- 回転速度に限界
- 回転半径は大きい

高い総発熱量を受けられる。
機械系の寿命は重要

Beam Window of ILC_Dump J-PARC Muon標的

ILC_Dump～大強度かつ高発熱密度を分散するために水を利用。真空隔壁に64Ti製窓を使用

ILC_Dumpにおける、軸方向熱分布を参照

J-PARC Muon標的では黒鉛製の回転標的。

	ILC Dump_BW	J-PARC Muon
材質	64Ti (d=4.43 g/cc)	黒鉛(d=1.82 g/cc)
厚み	1 mm	20 mm
ビームロス	25 W	4000 W
ビーム径 (σ)	x=2.4 mm, y=0.3 mm	3.5 mm
方式	Rastering	回転
Sweep径・周波数	60 mm, 1kHz	150 mm, 1/4 Hz

(Internal Target : 10 mm (Be: d=1.85))

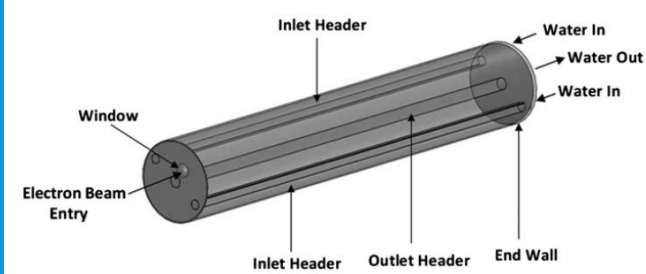
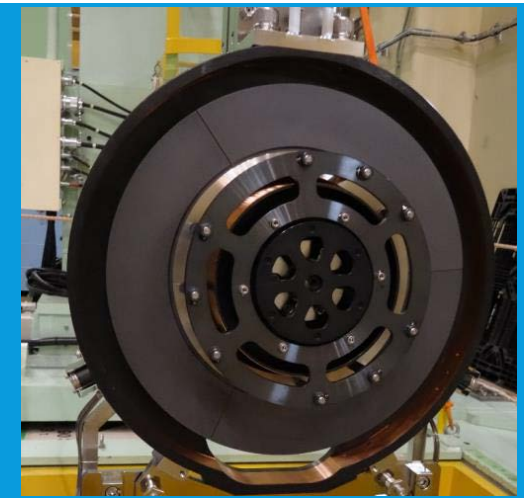
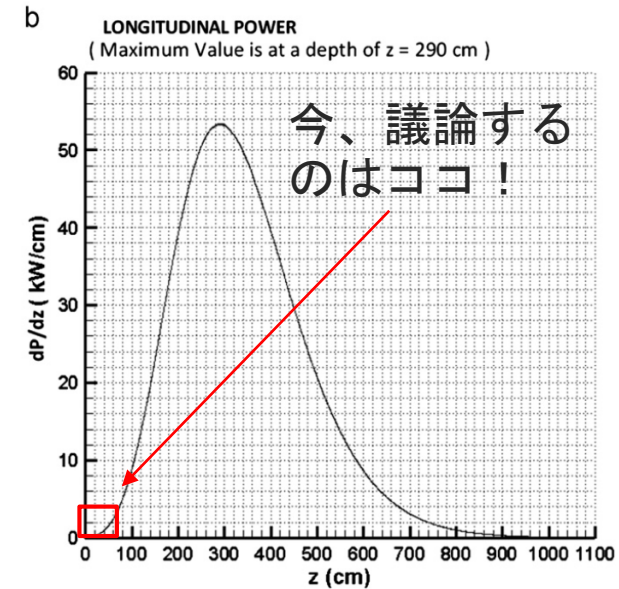
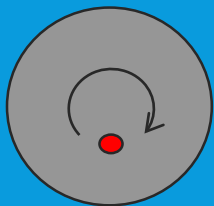


Fig. 1. Schematic of the water beam dump of vortex-type flow.



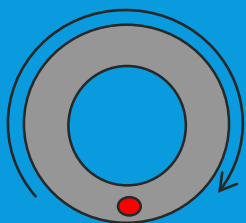
Internal target 検討のために

Rastering vs 回転標的方式



Rastering

- 電気的なSweepのため高速で回転できるので、高い発熱密度（小さなビーム径）を受け入れやすい。
- 標的自体は固定なので、窓を兼ねて、標的～He冷却～標的～He冷却～標的～～という方式が可能
- ビームが動くのでミュオン生成源の位置が動き、ミュオンビームの質が低下する。（12 cmの位置ずれを受け入れ可能か）



回転標的

- 機械的な回転のため高速で回転できるかが重要。耐放射線性や回転体の遠心力に対する耐力を無視すれば100-500 Hzくらいはいけるか？上記、諸々を考えると1 kHz以上は難しい。
- ILCではbeam durationが1msecなので1kHz以上は無意味。
- 標的自体は回転するので輻射冷却となる。標的材は高温になる。
- ビームは動かないので、良質なミュオンビームを得られる。直径を大きくすれば大強度でも受けられる。

どちらの方式でも概念は同じ。既存の技術で実現可能な範囲で検証。

ビームの質を考えると回転標的の実現できることが望ましい。

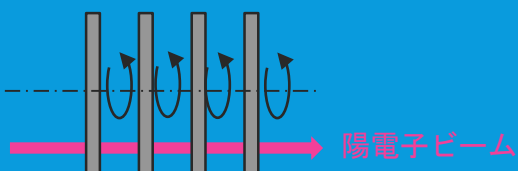
Internal Target材料の検討

64チタン vs 黒鉛 vs ベリリウム

(室温)での比較 参考値	64チタン	等方性黒鉛 IG-430U	ベリリウム
密度	4.43 g/cc	1.82 g/cc	1.85 g/cc
熱伝導率	7.5 W/m/K	130 W/m/K	200 W/m/K
熱膨張係数 α	8.8 ppm/K	6 ppm/K	11.3 ppm/K
融点/使用可能温度	1600°C/400°C	3400°C/1600°C	1287°C/450°C
ヤング率 E	106 GPa	11 GPa	287 GPa
引張強度 σ	1 GPa	40 MPa	(300-500 MPa)※
熱衝撃耐性 $\sigma/(\alpha E)$	(1070)	606	89
コメント	Al, Vを数%含む ので難しい。	強度が低いので、 窓には使えない	Rastering窓方式 には良い

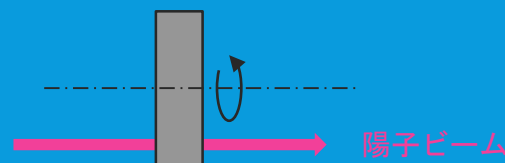
Internal Targetの実現可能性の検証 (発熱密度からの検証)

- J-PARC_Muon標的をベースに検討。Be: $t=10$ mm (山崎計算) の代わりに黒鉛: $t=2.5$ mm \times 4枚。その他は今のまま。
- 総発熱では問題にならない。回転速度による発熱密度の分散の検証
- ILCビームによるロスが密度に比例すると仮定すると、 ${}^{64}\text{Ti}$ ($t=1$ mm) と黒鉛 ($t=2.5$ mm) はロスが同じになる (密度比より)。25 Wの発熱
- J-PARC_Muon標的では、20mm厚で4000Wだから、2.5mmでは500 W。
- ILCではビーム径は $x=2.4$ mm \times $y=0.3$ mmだから、 0.72 mm² (Muon標的と相对比较するので、一様発熱と仮定して、円周率は省略)
- J-PARC_Muon標的では、ビーム径は $x=y=3.5$ mmだから、 12.25 mm²



ILC Internal Target (黒鉛)

相対発熱密度 : $25/0.72=34.7$ W/mm²



J-PARC Muon標的 (黒鉛)

相対発熱密度 : $500/12.25=40.8$ W/mm²

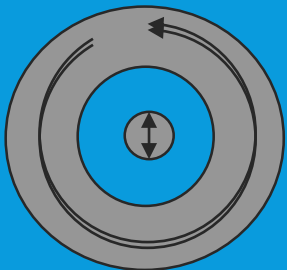
現在のJ-PARC_Muon標的と、同程度。今のままでも使用可能

Internal Targetの実現可能性の検証 (ビーム径小型化の検証)

- Internal Targetの場合、ビーム径はどこまで小さく出来るか？
- 黒鉛最高温、黒鉛内の温度差、パルスビームによる熱衝撃を考えれば良い。比熱は高温ほど比熱が高い（600°Cで室温の1.5倍程度）ので熱衝撃耐性は落ちる。熱伝導率等も温度依存性があるので再設計が必要だが、現在のJ-PARC_Muon標的は設計裕度は高いので、問題にはならない。
- 例えば、現在のミュオン標的でも設計裕度の限界を狙えば、約5倍のビームロスを受け入れられる。
- 軸受の寿命確認試験では、高速回転（300 rpm、通常は15 rpm）も試験済みなので、20倍程度の発熱密度上昇は受けられる。
- 安全性を考え、10倍程度の設計裕度を考えれば、 $x=y=0.3$ mmのビーム径は受け入れられると推測できる。

まとめ 更なる検討

- ILCのInternal Targetの場合、ILC_DUMPの窓に相当するので、発熱条件はそれほど厳しくない。
- 現段階の素計算ではILCのInternal Targetの標的の実現可能性は高い。
- 更なる検討として、ビーム径 $1\ \mu\text{m}$ の場合には発熱密度を分散させるための新たな概念の標的が必要となる。
- 例えば、「予熱した $1\ \mu\text{m}$ 厚の荷電変換ストリッパフォイル10000枚で除熱能力を極限まで高める」とか、「巨大回転標的」とか、「ハイブリッド（振動＋回転）標的」とか？（ロマンを追う。）



- 磁気浮上軸受に数 μm の振動
- 5kHzの回転数で5倍に分散

ご静聴ありがとうございます。