

# ILC Undulator Photonを利用したMo-99製造

ILCの多角的活用を考える会Ⅱ 2018/7/5

KEK 森川 祐



# はじめに

**Tc-99mは世界中で最も多用されている医用ラジオアイソトープである**

- ◆ Mo-99（半減期66時間）の崩壊により Tc-99m(半減期6時間) を得る
- ◆ 核医学検査の80%以上はTc-99mを使用して行われている。
- ◆ Mo-99の5大供給国：カナダ、オランダ、ベルギー、フランス、南アフリカ
- ◆ 殆ど（>95%）のMo-99は高濃縮ウラン（HEU）の核分裂により製造される。
- ◆ 製造用原子炉の老朽化とテロの脅威がMo-99供給の不安定要因となっている。
- ◆ 途上国での需要増大もあり、市場価格は上昇傾向にある。

**日本はMo-99を全て輸入に頼っている ⇒ 国産化の可能性を探りたい**

**☆ ILC Undulator Photon を利用した Mo-99 製造の可能性を検証**

## 今回の報告内容

1. 世界/日本国内のMo-99/Tc-99mの需要
2. 加速器を利用したMo-99の製造
3. ILC Undulator Photonを利用した場合のMo-99製造
4. Mo-99生成標的の検討 – 1<sup>st</sup> Trial (主に冷却性能の検討)

Mo-99/Tc-99mの背景情報は下記を参照した。

\* 世界のMo-99の供給現状と課題, 平成20年11月18日, 源田次雄

\* [我が国のテクネチウム製剤の安定供給]に向けてのアクションプラン, 平成23年7月7日, モリブデン-99/テクネチウム-99mの安定供給のための官民検討会

# 世界/日本国内のMo-99/Tc-99mの供給状況

## 世界の製造状況 \* 1

Mo-99を製造している主な原子炉と供給業者

TG-4

古い原子炉5基と供給業者4社で世界需要の95%をカバーしている

Mo-99製造量\*: 17.3 PBq (468,000 Ci) \* Nuclear Engineering International July 2008

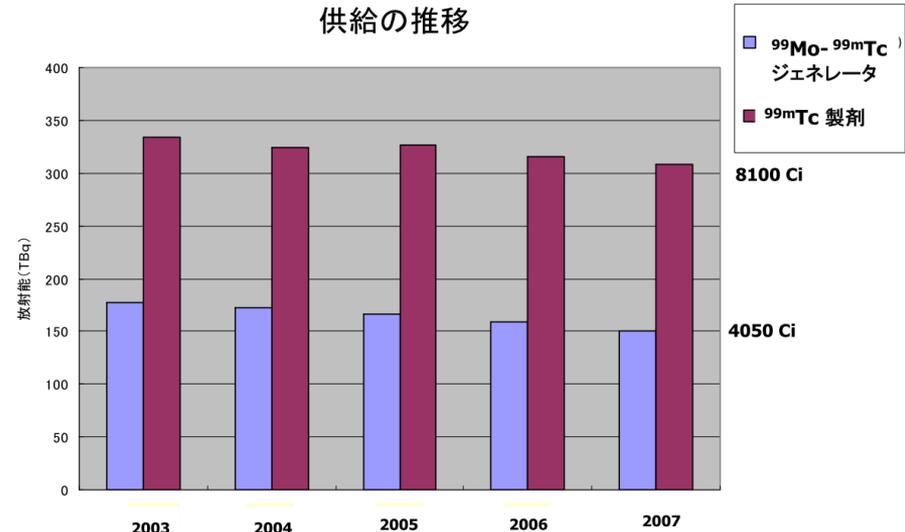
国名	原子炉	熱出力 (MW)	初臨界	稼働率 (%年)	供給業者	充当率 (%世界需要)
カナダ	NRU	135	1957	86	MDS-Nordion	38
オランダ	HFR	45	1961	79	Covidien, IRE	16 10
ベルギー	BR2	100	1961	31	Covidien, IRE	10 3
フランス	Osiris	70	1964	60	IRE	3
南アフリカ	SAFARI-1	20	1965	86	NTP	15
その他	OPAL, RA-3, GAS-MPR, HWRR-II, Dhruva 他					5

## 日本の供給状況 \* 1

TG-6

わが国の  $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ジェネレータ及び  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  製剤

供給の推移



アイソトープ等流通統計2008 社団法人日本アイソトープ協会のデータを基にグラフ化

- ◆ 世界の全Mo-99製造量は468,000Ciであり、日本での市場消費量は~12,000Ci程度。日本に輸送する間にもMo-99が崩壊するために、崩壊分も含めた実際の日本の消費量は~65,000Ci程度で世界製造量の~14%を消費している。
- ◆ 週あたりに換算すると日本国内需要はおよそ **1000 6day-Ci** に相当する \* 2

\* 1 世界のMo-99の供給現状と課題, 平成20年11月18日, 源田次雄

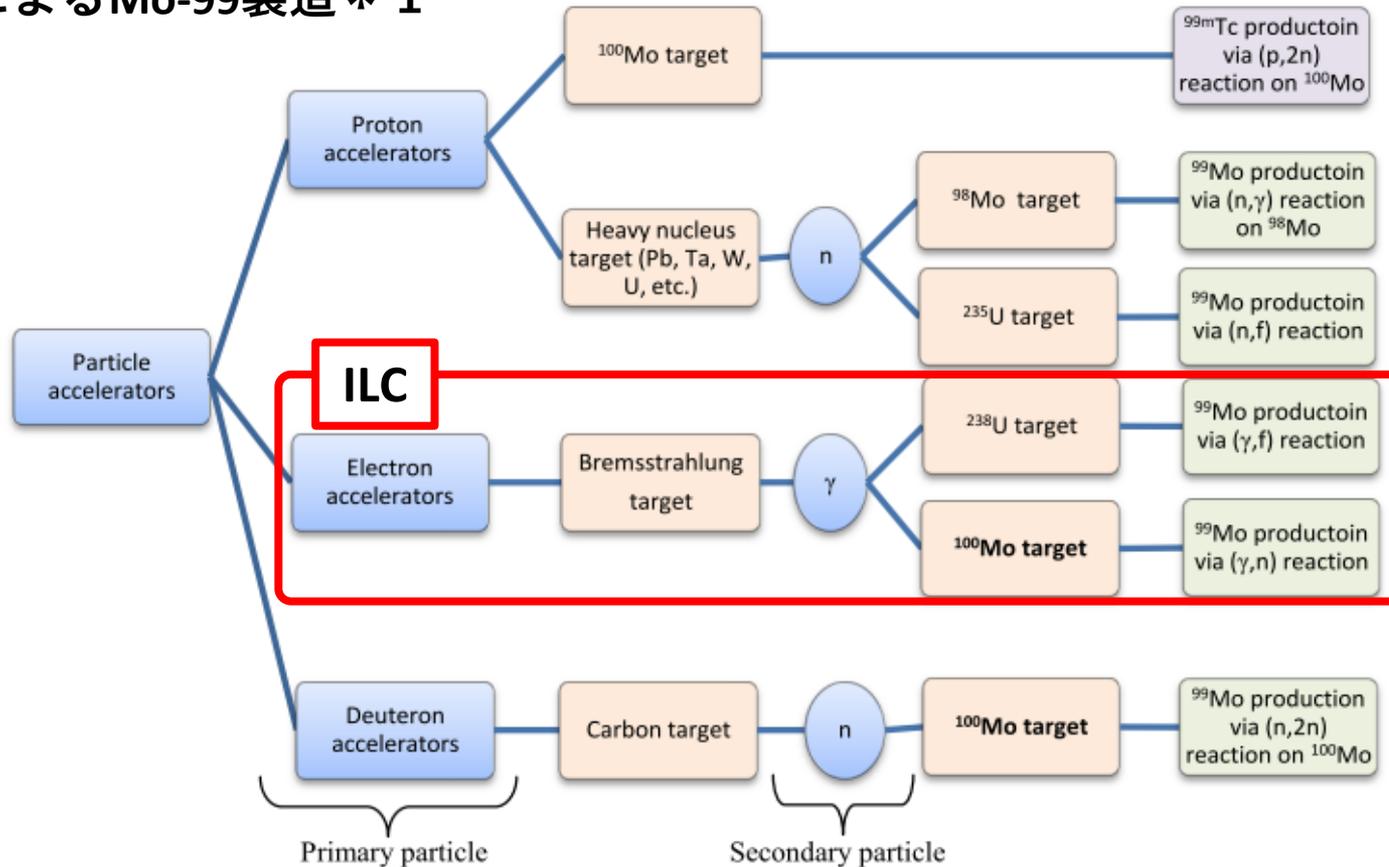
\* 2 [我が国のテクネチウム製剤の安定供給]に向けてのアクションプラン, 平成23年7月7日, モリブデン-99/テクネチウム-99mの安定供給のための官民検討会

\* Ci=3.7 × 10<sup>10</sup>Bq, 6day-Ciは分離・精製施設を出荷してから6日後の放射線量を指す。



# 加速器を利用したのMo-99製造

## 加速器によるMo-99製造 \* 1



◆ 電子加速器でMo-99製造をする場合は電子ビームの制動放射を利用して  $^{238}\text{U}(\gamma,f)^{99}\text{Mo}$  又は  $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$  の反応を狙う

\* 1 The Supply of Medical Radioisotopes, Nov 2010 , OECD NEA



# ILCを利用したRI製造の可能性

## ILCビームの副次利用

恒常的にダンプに捨てているビームがあり、これらを利用する分にはILC運転と共存する。

- ・ 陽電子生成用Undulator Photon ← 今回報告
- ・ 衝突実験後のビーム

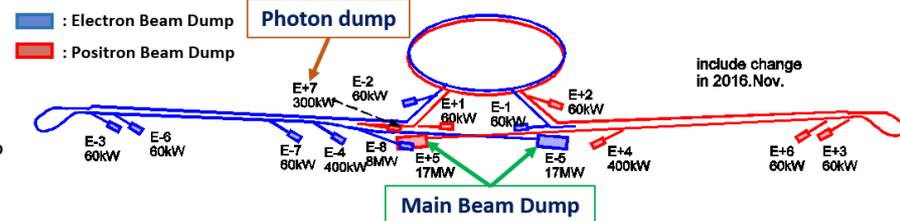
特にUndulator Photonは光核破碎反応断面積ピーク帯のエネルギーを持つ

## 超伝導技術の利用

超伝導加速空洞では大電流CW運転が可能でありRI製造と相性が良い。

ILCで導入されるHigh-Q超伝導加速空洞や大電力入力カップラーは超伝導加速システムの小型化、低コスト化に資する。

## ILCビームダンプの概要



Total 15 Beam dumps in ILC . Beam dumps are classified into 5 types.

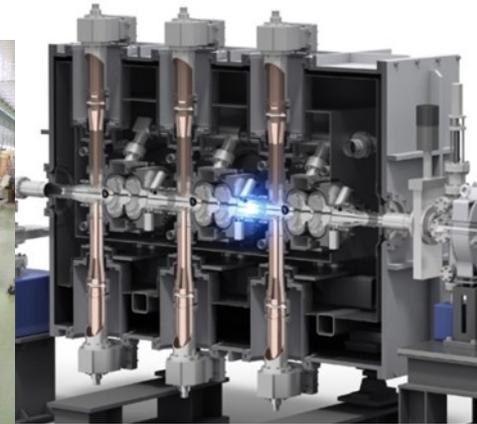
Type	Power	Purpose	Absorber	Place
A	60kW	Tune-up	Solid material	9[E-1,E-2,E-3,E-6,E-7,E+1,E+2,E+3,E+6]
B	400kW	Tune-up & Emergency	Solid material	2[E-4,E+4]
C	300kW	Photon Dump	Water or Graphite	1[E+7]
D	8MW	5 + 5 Hz Operation	Liquid-water	1[E-8]
E	17MW	Main Beam-Dump	Water	2[E-5,E+5]

## KEKで試験されている超伝導加速空洞システム



this picture is STF phase1 cryomodule

STF-超伝導加速システム

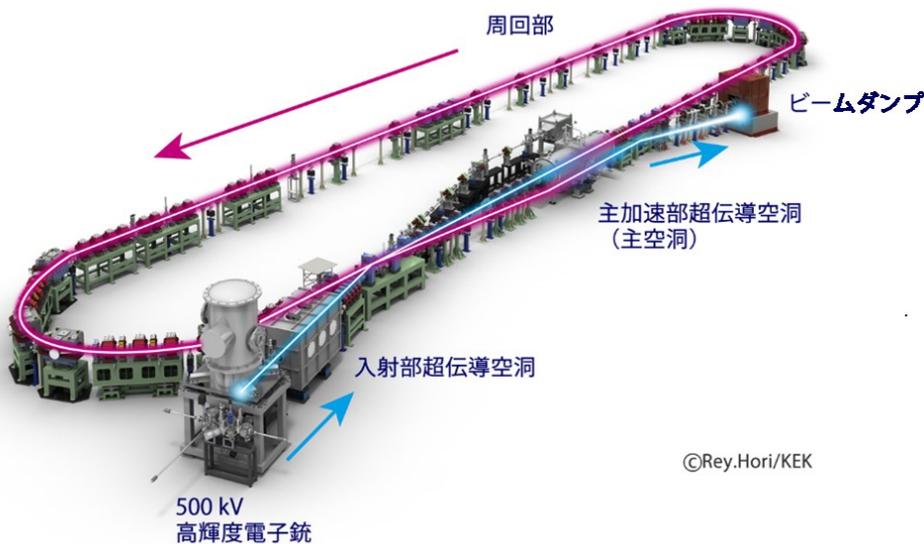


cERL- 入射器用超伝導空洞



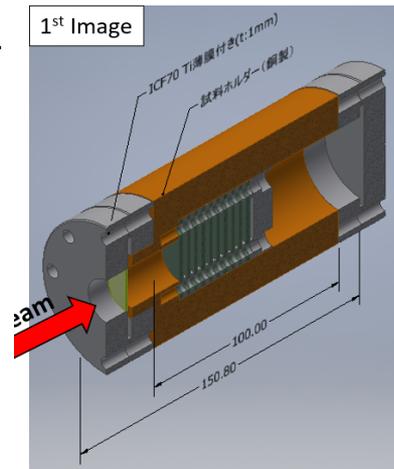
# 超伝導技術を利用したMo-99製造試験

## cERL Layout

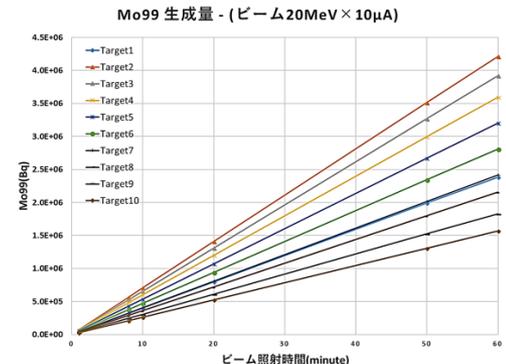


## 開発中のMo標的

### Mo99生成量見積



2mm厚のMo-Diskを10枚入れた場合の生成量  
\* Beam size  $\sigma=3\text{mm}$ , Target1が一番手前



◆ KEK-cERL\*にて超伝導加速器応用試験を進めており、次年度よりMo-99製造試験を開始する。(今年度はアスファルト改質を狙ったビーム照射試験を予定している。)

### 【cERLにおけるMo-99製造試験】

大強度ビームによるMo-99製造の実現に向けて、Mo-99製造量の評価方法や標的の熱設計、放射線遮蔽の設計と法的手続きなどに対する手法を確立する。

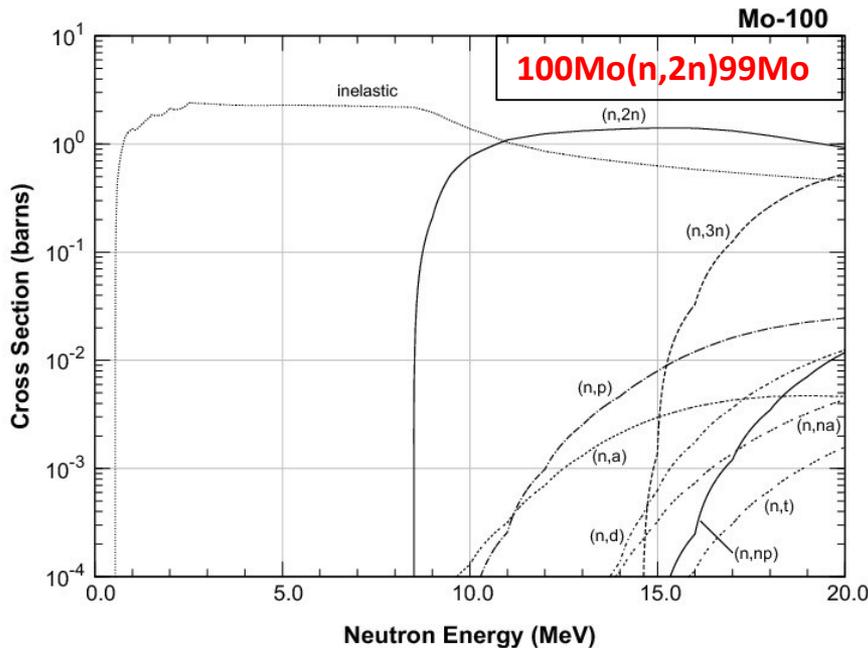
次年度はまず20MeV × 10μAの電子ビームでMo-99製造試験を行う予定。

\* compact Energy Recovery Linac

**ここからが今回の本題**  
**ILC Undulator Photonを利用したMo-99製造**

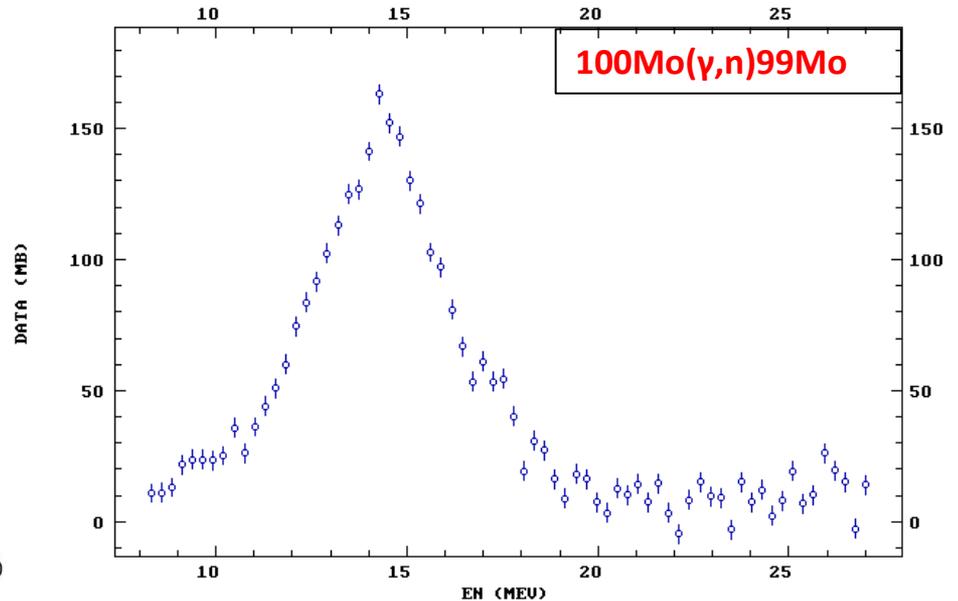


# Undulator Photonを利用したMo-99製造



中性子反応断面積

EXFOR #L0032017: 1974,H.Beil+  
(42-MO-100(G,N)42-MO-99,,SIG)+(42-MO-100(G,N+P)41-NB-98,,SIG)



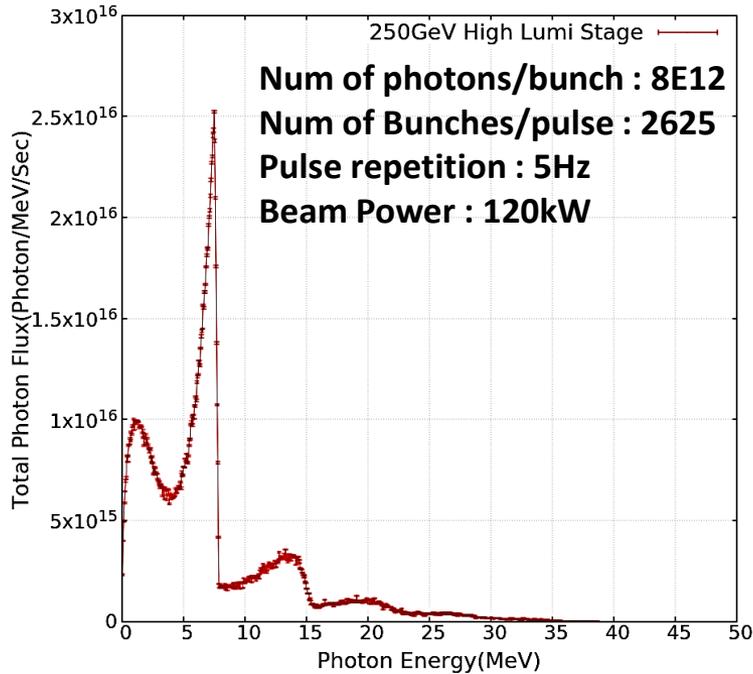
光核破砕反応断面積

- ◆  $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$ の光核破砕は14MeVで反応断面積ピークをもつ。  
実はILC Undulator PhotonのEnergyは丁度この辺り!!
- ◆ Mo-100に限らず、10MeV帯に巨大共鳴効果による反応断面積ピークを持つことが多く、他のRI製造にも使える。

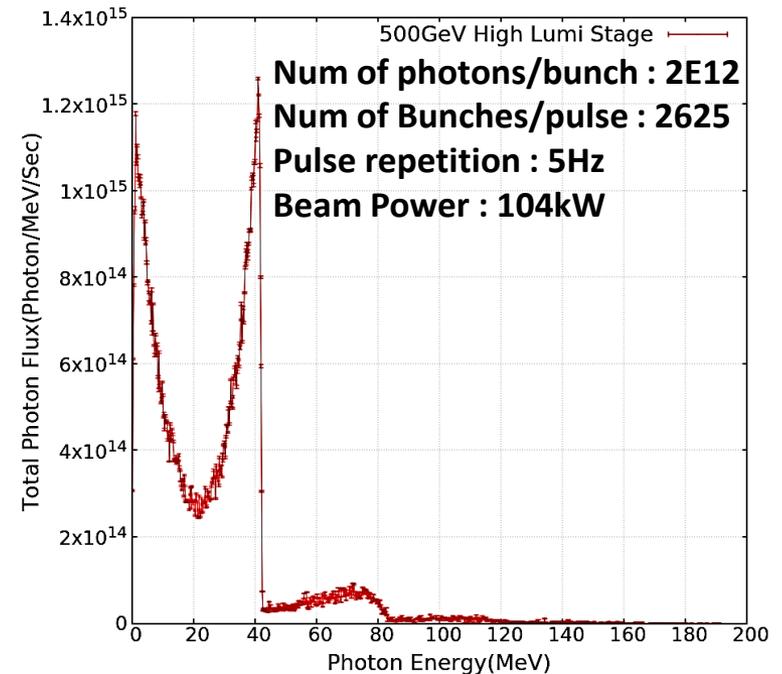


# Undulator Photonを利用したMo-99製造

## Photon Energy Spectrum@250GeV stage



## Photon Energy Spectrum@500GeV stage



- ◆ ILCでは陽電子生成にUndulatorで生成した $\gamma$ 線を利用する。
- ◆ この $\gamma$ 線は100kW以上の熱量をもつが陽電子生成標的では10kW程度しか消費されず、大半はビームダンプに捨てられる。

⇒Undulator PhotonによるMo-99製造はILC運転を阻害しない。

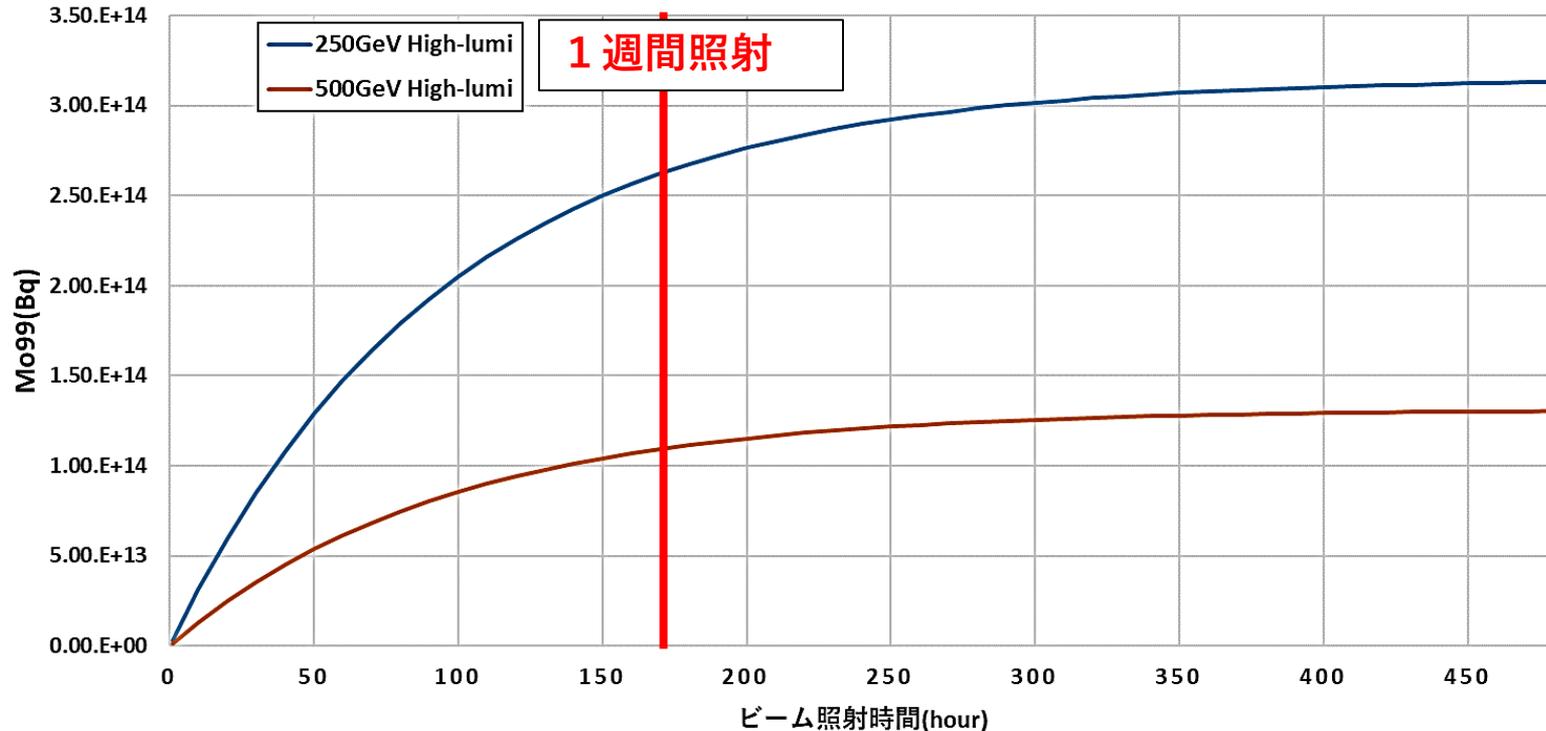
\* Undulator Photon Dataは横谷さんからいただいた。

\* バンチ数やビームパワーはHigh-lumi stageのもの。Low-lumi stageだとバンチが半分になってパワーも半分。



# Undulator Photonを利用したMo-99製造

## Mo-99 製造量シミュレーション



濃縮Mo100にUndulator Photonを入射した場合のMo99製造量を評価\*

- ◆ 1週間のビーム運転でMo-99は~270TBq(250GeV), ~110TBq(500GeV)生成できる。
- ◆ Mo-99の分離・精製に2日かかるとすると、~1,000 6day-Ci(250GeV), ~400 6day-Ci(500GeV)となる。日本のMo-99需要(~1,000 6day-Ci/週)の大半を賄える。

\* モンテカルロコードFlukaで計算。ビームを十分に受けきれぬ大きさ(1m角)の濃縮(100%)Mo100にUndulator Photonを入射させた。



# Undulator Photonを利用したMo-99製造

## Mo-99 製造方法比較\*

国産化方策	製造法	供給能力	
		供給量 (6day-Ci/週)	想定 年稼働率
研究炉製造法	三酸化モリブデン(天然) 98 Mo(n, $\gamma$ ) 99 Mo	230	~60%
発電炉製造法	金属Mo(天然) 98 Mo(n, $\gamma$ ) 99 Mo	1,000~4,000	~75%(1基体制) 100%(2基体制)
大型加速器製造法	濃縮Mo100 100 Mo(n, 2n) 99 Mo	126	~83%
中小型加速器製造法	濃縮Mo100 100 Mo(p, x) 99 Mo (中型) 100 Mo(p, x) 99m Tc (小型)	40(中型) 16(小型)	~93%
<b>ILC</b> <b>Undulator Photon</b>	濃縮Mo100 100Mo( $\gamma$ , n)99 Mo	1,000(250GeV) 400(500GeV)	~57% (5000h/y運転)

◆ ILCの稼働率は高くないが、  
加速器製造法の中では最大の製造能力を持つ。

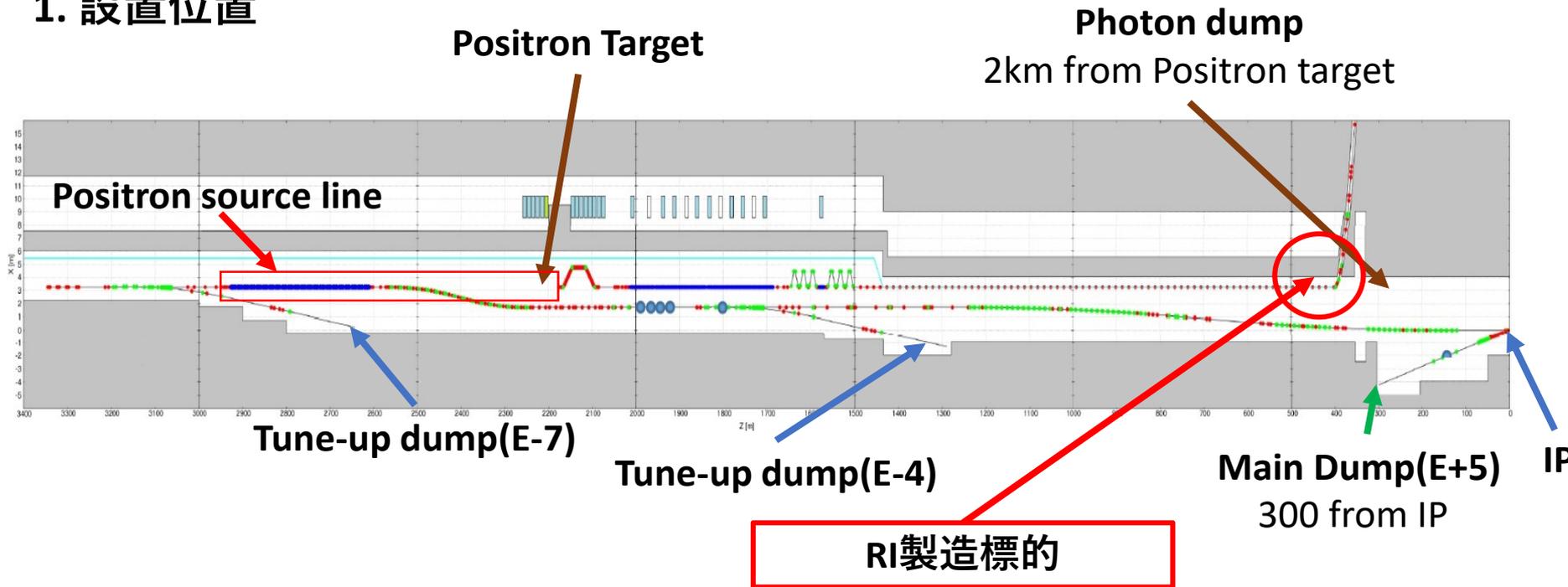
\* ILC以外は以下より抜粋

[我が国のテクネチウム製剤の安定供給]に向けてのアクションプラン,平成23年7月7日,モリブデン-99/テクネチウム-99mの安定供給のための官民検討会 11

# Mo-99生成標的の検討

Undulator Photonを受けきる標的の実現可能性を検証する。

## 1. 設置位置



- ◆ Photon Dumpは陽電子生成標的から2km離れている。  
Mo-99生成標的もビーム発熱密度を下げるため、2km離れた位置を想定する。

# Mo-99生成標的の検討

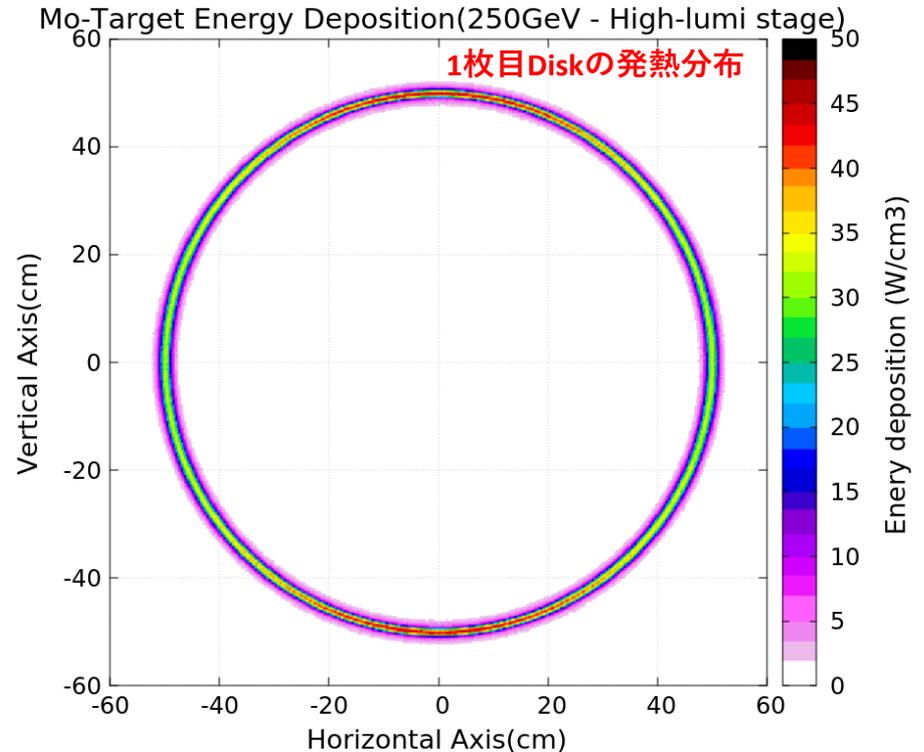
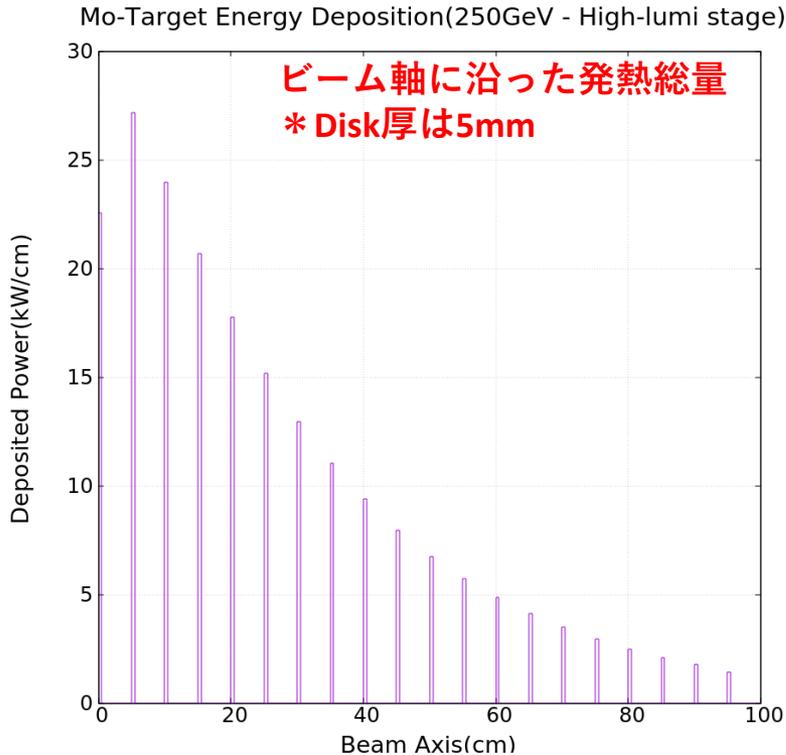
## 2. 基礎設計

☆基本設計は陽電子標的を模倣し、放射冷却型の回転標的とする。  
ただし発熱量を分散させるために回転Diskは薄型で複数枚導入する。



- ◆ Diskサイズ : 直径1m厚み5mm(直径は陽電子標的と同じ)、全Disk枚数 : 20枚  
Mo-Diskの放射率は表面酸化したとして0.8を仮定
- ◆ 回転速度は陽電子標的と同じく2000rpm。ビーム照射位置では100m/secとなる。

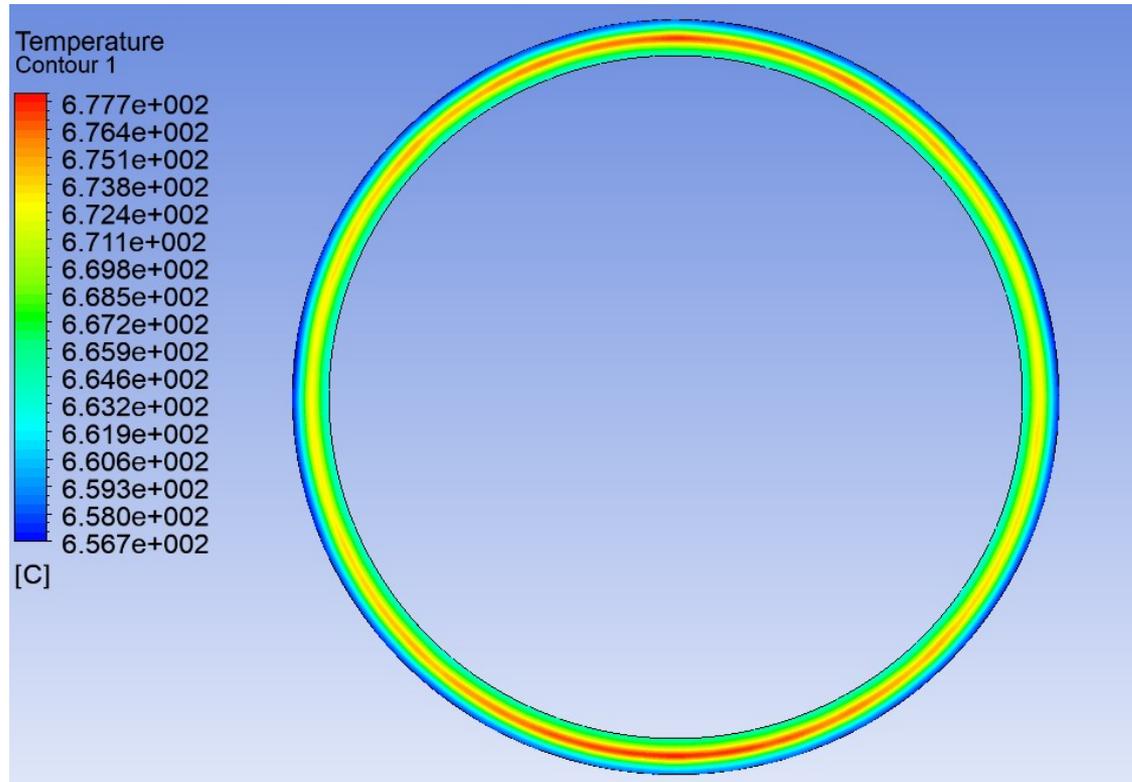
## 3. 熱負荷



- ◆ 2枚目のDiskが最も発熱する(13kW)が、最大発熱密度は1枚目で観測される(50W/cm<sup>3</sup>)
- ◆ Undulator Photon 1パルスでの最大発熱密度は~30J/gであり、~120°Cの昇温になる。

## 4. 標的上の温度分布

### 2<sup>nd</sup> Disk(13kW)の温度分布(定常解析)



モリブデン部分のみをモデル化して熱評価。

- ◆ 最も熱負荷のある2nd Diskの最高温度は800°C(680°C(定常)+120°C(パルス昇温))程度。実際はモリブデン部以外の輻射冷却も期待できるのでまだまだ温度は下がる。
- ◆ 熱応力や高温域での物性変化、衝撃波など検証項目は残されているが、Mo融点2620°Cと比べ運転温度は低く、温度評価としてはUndulator Photonを受けきれ。(最適化の余地もまだある)

# まとめ

- ◆ Undulator Photonを利用することでRI製造が可能であり、陽電子生成後のUndulator Photonを使うのでILC運転を阻害しない。
- ◆ Mo-99を製造した場合は日本国内需要の大半を賄える可能性がある。
  - ILC 250GeV High-lumi stage : 1,000 6day-Ci/週
  - 500GeV High-lumi stage : 400 6day-Ci/週
  - 日本国内需要 : 1,000 6day-Ci/週
- ◆ Mo-99生成標的として放射冷却型回転標的の可能性を検討したところ、検証課題は残っているものの現段階では実現可能性は十分にあるように見える。また実質Photon Dumpになっている。

技術課題の詳細検討や、コスト評価などは残るが、  
ILC Undulator PhotonのRI製造能力は放っておくには勿体ない。

・・・私見ですが