

PREPARASI TARGET IRRADIASI

PELATIHAN

Petugas Keahlian pada Fasilitas Radioisotop
dan/atau Radiofarmaka dari Reaktor

angkatan 2



Direktorat Pengembangan Kompetensi
Badan Riset dan Inovasi Nasional

Oleh :
Aulia Arivin Billah,
Dr. Marlina





Biodata:

Nama	Aulia Arivin Billah, S.Si, M.Si
Instansi / Pusat Riset	BATAN-BRIN / Pusat Riset Teknologi Radioisotop, Radiofarmaka dan Biodosimetri (2018-2026)
S1	Prodi Kimia, FMIPA, Universitas Andalas 2012-2017
S2	Prodi Ilmu Kimia, FMIPA, Universitas Indonesia 2021-2024
Kepakaran	Kimia Nuklir
Email	auli004@brin.go.id , arivin721994@gmail.com ,
Link google scholar	https://scholar.google.com/citations?user=ONHZX3kAAAAJ&hl=en

Tujuan Pembelajaran

- Setelah mengikuti pembelajaran ini peserta mampu menjelaskan proses preparasi target iradiasi yang benar sesuai prosedur keamanan dan keselamatan di fasilitas iradiasi reaktor G.A Siwabessy Serpong
- Indikator Pembelajaran
 - - Peserta mampu menjelaskan alasan dalam memilih jenis target iradiasi dan menyesuaikan fasilitas yang tersedia
 - - Peserta mampu menjelaskan prosedur penyiapan target iradiasi yang sesuai dengan SOP

Manfaat

1. Peserta mampu memilih jenis target iradiasi untuk menghasilkan radionuklida yang diinginkan
2. Peserta mengetahui alur proses sistem pra iradiasi di Reaktor Riset G.A Siwabessy serpong



PREPARASI TARGET IRADIASI



Apa itu iradiasi dengan reaktor?

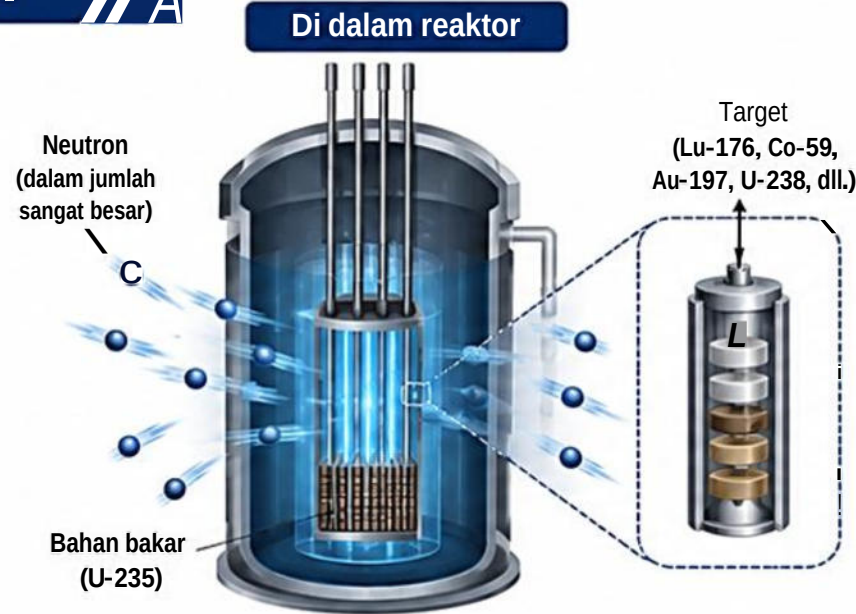
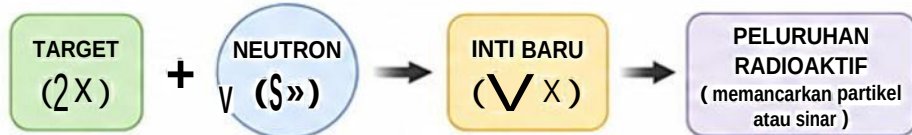


Di dalam reaktor nuklir terjadi **reaksi fisi berantai** yang menghasilkan **neutron dalam jumlah sangat besar**.

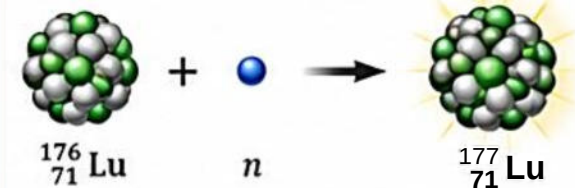


Ketika suatu target (misalnya Lu-176, Co-59, Au-197, atau U-238) ditempatkan di medan neutron tersebut, inti atom target dapat **menangkap neutron** dan **berubah menjadi inti baru** yang sering kali bersifat radioaktif.

Skema sederhananya:



Contoh: Produksi Lu-177



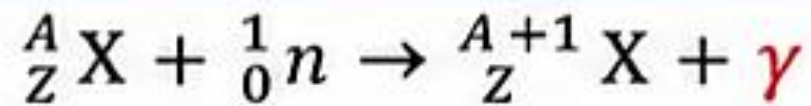
Lu-177 yang terbentuk bersifat radioaktif dan digunakan untuk **terapi kanker**.

2 Reaksi apa yang terjadi?

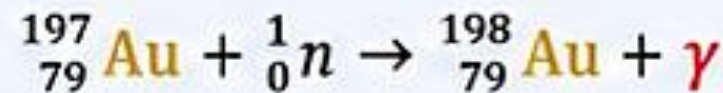
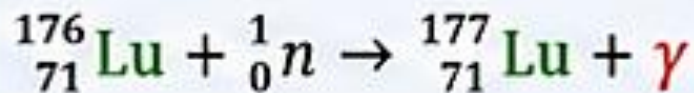
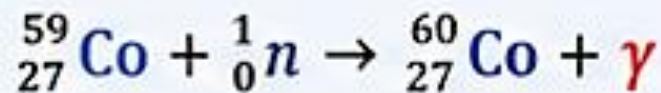
Ada beberapa jenis reaksi nuklir yang dapat terjadi.

A Penangkapan neutron (n, γ)

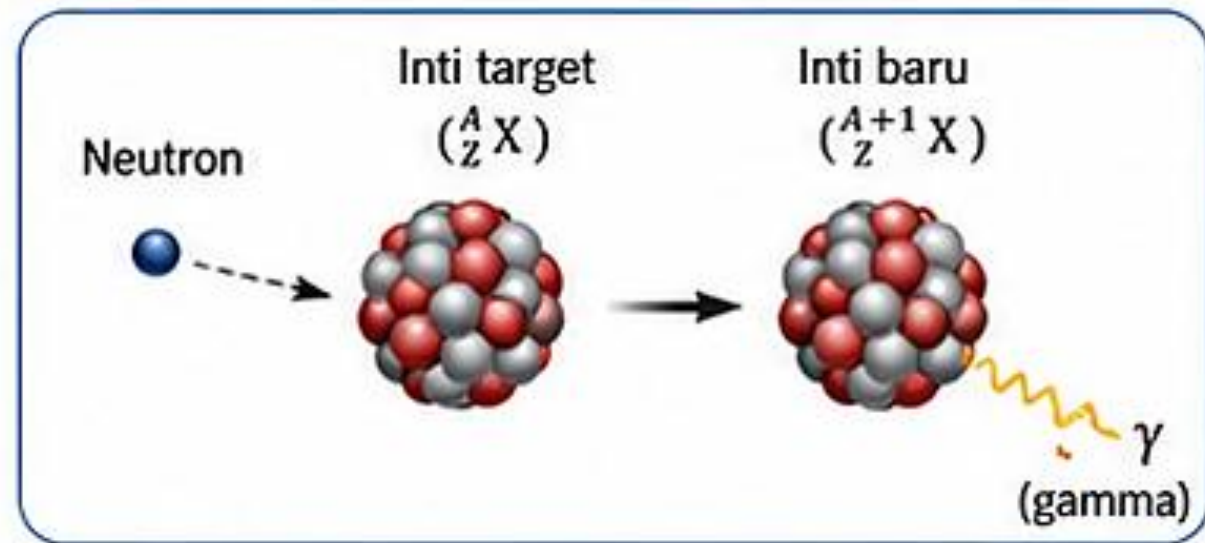
Ini adalah reaksi paling umum pada reaktor.



Contoh:



Neutron ditangkap dan inti **memancarkan sinar gamma**.

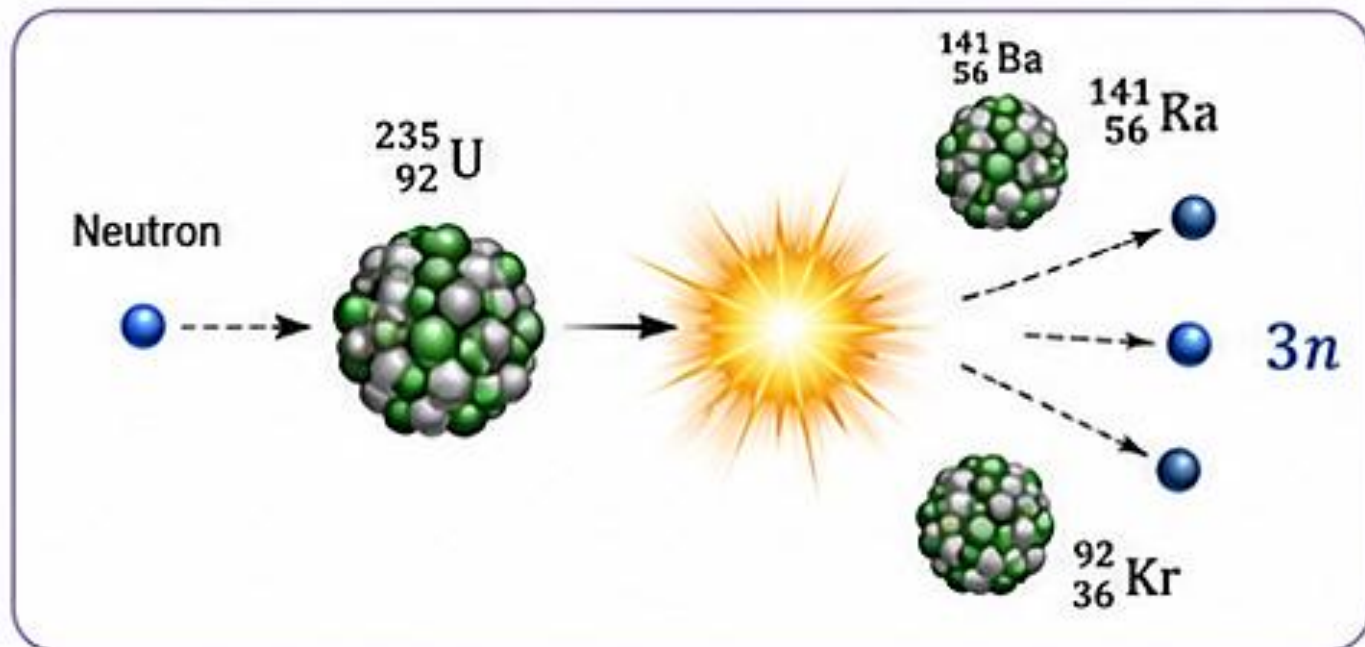
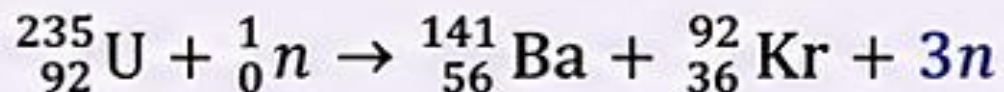


B Reaksi fisi

Terjadi pada inti berat seperti U-235.



Contoh:



Energi yang dilepaskan sekitar:

200 MeV/fisi



Inilah **sumber neutron** dalam reaktor.



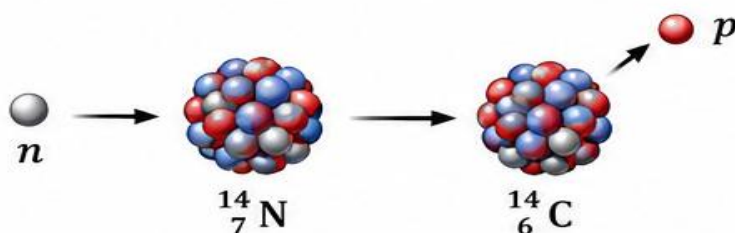
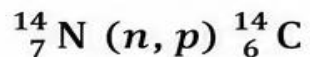
PREPARASI TARGET IRADIASI



C. Reaksi (n,p)

Neutron masuk dan proton keluar.

Contoh:

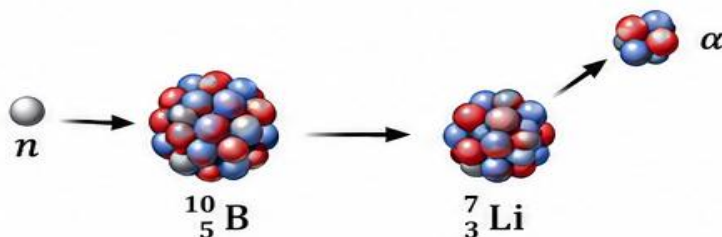
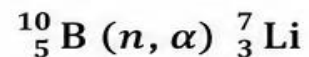


n = neutron p = proton

D. Reaksi (n,α)

Neutron masuk dan partikel alfa keluar.

Contoh:

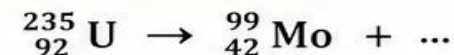


Reaksi ini banyak digunakan pada detektor neutron.

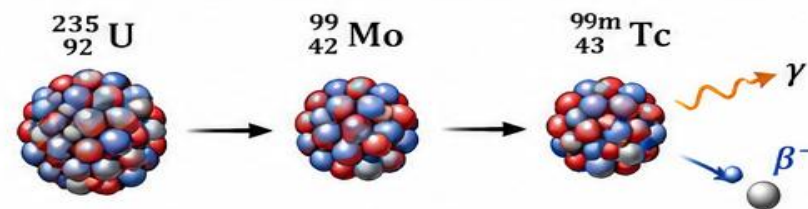
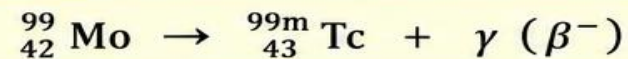
E. Reaksi berantai peluruhan

Kadang inti hasil iradiasi meluruh menjadi radioisotop lain.

Contoh produksi Mo-99:



Kemudian:

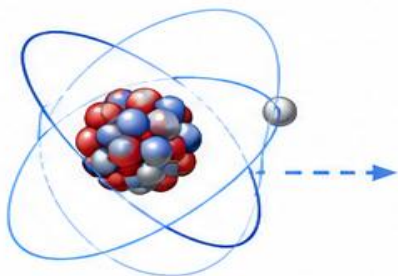


3 Apa persyaratan agar reaksi terjadi?

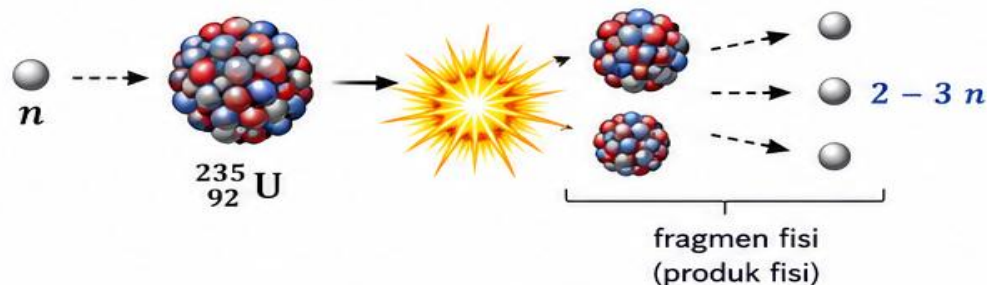
Ada beberapa syarat penting.

A. Harus ada neutron

Tanpa neutron, reaksi aktivasi tidak terjadi.



Sumber neutron di reaktor berasal dari fisi:



n

Neutron hasil fisi ini akan memicu reaksi berantai di dalam reaktor.

B. Neutron harus mencapai target

Jumlah neutron yang mengenai target disebut fluks neutron (neutron flux).

$$\phi = \frac{\text{jumlah neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

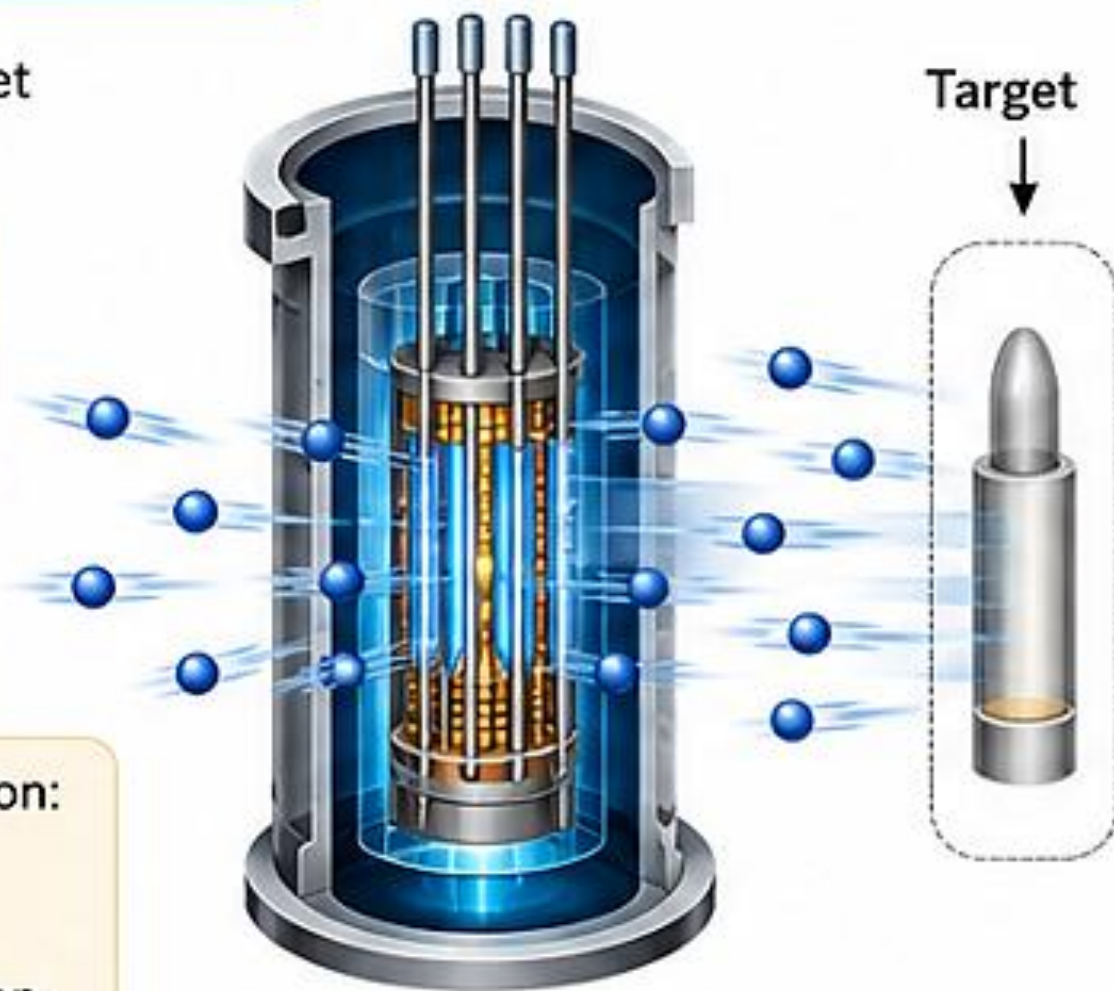
Reaktor riset biasanya memiliki:

$$10^{12} - 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$$



Semakin tinggi fluks neutron:

- semakin cepat aktivasi,
- semakin tinggi aktivitas radioisotop yang dihasilkan.



C. Target harus memiliki penampang lintang reaksi (cross section)

Tidak semua inti mudah menangkap neutron.

Peluang reaksi diukur dengan:

σ

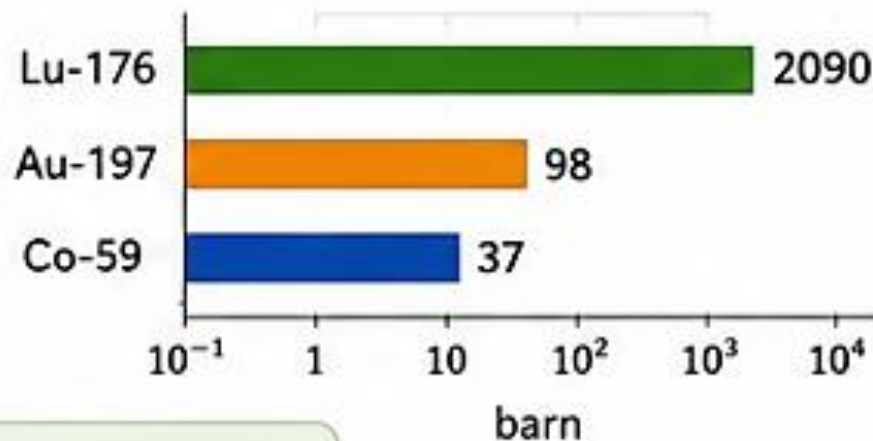
satuan:

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Contoh:

- Lu-176 $\approx$ 2090 barn
- Co-59 $\approx$ 37 barn
- Au-197 $\approx$ 98 barn

Perbandingan cross section (barn)

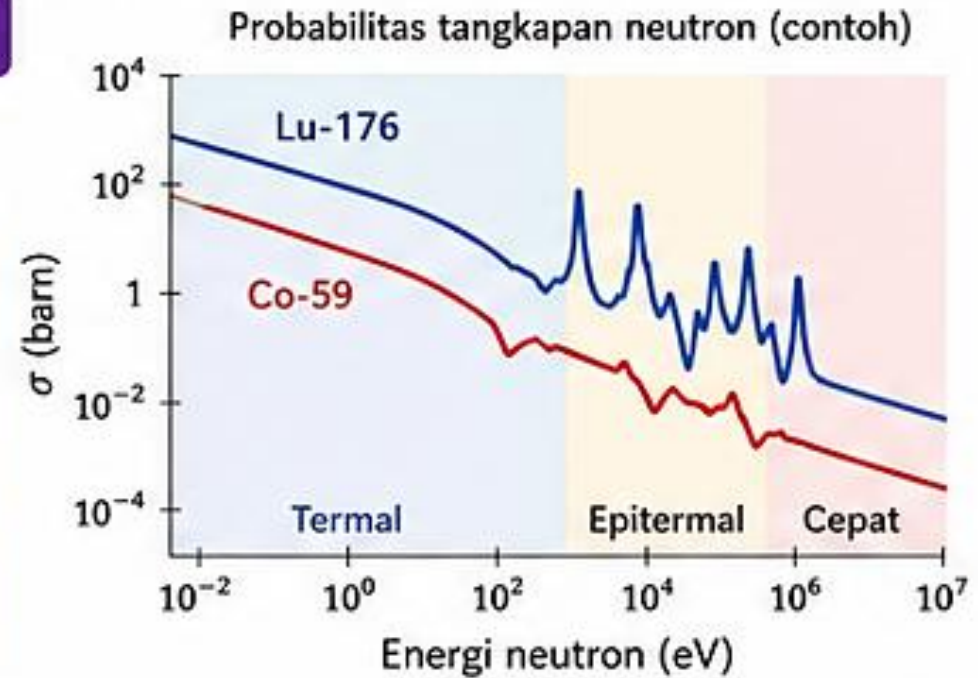


Semakin besar σ , semakin mudah reaksi terjadi.

D. Energi neutron harus sesuai

Neutron dalam reaktor dapat berupa:

	Neutron termal	$E \approx 0.025 \text{ eV}$
	Neutron epitermal	$0.5 \text{ eV} - 100 \text{ keV}$
	Neutron cepat	$> 100 \text{ keV}$



Banyak isotop (misalnya Lu-176 dan Co-59) lebih mudah menangkap neutron termal.



Karena itu reaktor menggunakan moderator seperti:

- air ringan (H_2O)
- air berat (D_2O)
- grafit

Moderator memperlambat neutron sehingga peluang tangkapan meningkat.

E. Waktu iradiasi cukup

Laju pembentukan radioisotop:

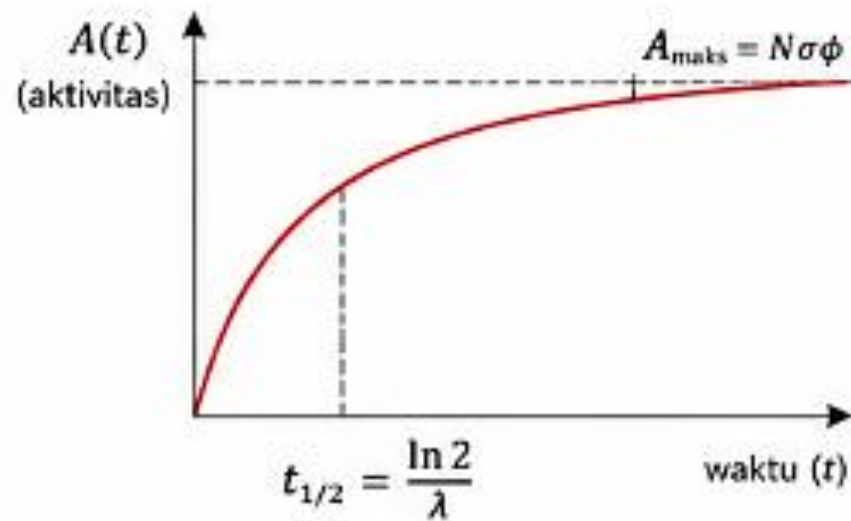
$$R = N\sigma\phi$$

dengan:

- N = jumlah atom target
- σ = cross section
- ϕ = fluks neutron

Aktivitas setelah waktu t :

$$A(t) = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})$$



Jika waktu iradiasi terlalu singkat, aktivitas yang dihasilkan kecil.

Link :
<https://www.wise-uranium.org/>

Kriteria Pemilihan Target Iradiasi

Berdasarkan teori dasar sebelumnya kriteria yang perlu dipenuhi dalam pemilihan target adalah sebagai berikut :

1. Jalur reaksi dan cross section harus besar
2. Produk samping minimum
3. Aktivitas Spesifik yang diinginkan
4. Kemudahan pemisahan kimia
5. Tidak membentuk kotaminan radionuklida berumur panjang
6. Waktu paruh produksi
7. Burn Up effect
8. Q Value dan energi neutron

Link Website untuk membantu pemilihan radioisotop target :

1. [IAEA LiveChart of Nuclides](#)

untuk tahap awal studi kelayakan produksi radionuklida. Data berasal dari ENSDF dan juga menyediakan informasi seperti:

- isotop stabil target
- waktu paruh radionuklida
- mode peluruhan
- branching ratio
- thermal neutron capture cross section
- fission yield untuk beberapa nuklida

2. [JANIS Nuclear Data System](#)

Untuk melihat:

- neutron capture cross section
- resonance integral
- (n,γ)
- (n,p)
- (n,α)
- fission cross section
- energy-dependent cross section

Dengan JANIS Anda dapat membandingkan misalnya:

Kemudian menilai apakah keuntungan aktivitas spesifik NCA Lu-177 sebanding dengan penurunan yield produksi.

Reaksi	Cross Section
Lu-176(n, γ)Lu-177	tinggi
Yb-176(n, γ)Yb-177	lebih rendah

[IAEA Medical Isotope Portal](#)

Ini sangat berguna untuk melihat karakter nuklir dari radioistop untuk keperluan radiofarmaka.

Portal ini memuat:

- data reaksi produksi PET
- data reaksi produksi SPECT
- recommended cross section
- thick target yield

PREPARASI TARGET PRA IRADIASI



1

Pemilihan wujud target (padat, cair, atau gas)

tergantung kemudahan pemisahan dan aktivitas yang dihasilkan berdasar densitas.

WUJUD TARGET	CONTOH	KEUNGGULAN	CONTOH PENERAPAN
 PADAT	Lu_2O_3 , CoO , Au foil, UO_2	Mudah ditangani, aktivitas tinggi (densitas tinggi)	Produksi Lu-177, Co-60, Au-198
 CAIR	H_2^{18}O , H_2SO_4 , larutan garam	Mudah diproses, pemisahan kimia lebih sederhana	Produksi radioisotop larutan (mis. I-131)
 GAS	N_2 , O_2 , Ar, Xe	Kemurnian tinggi, minim kontaminan	Produksi gas radioaktif (misal. N-13, Xe-133)

Pertimbangan utama

- ✓ Kemudahan pemisahan pasca iradiasi
- ✓ Aktivitas yang dihasilkan (berkaitan dengan densitas dan penampang lintang)
- ✓ Keamanan dan stabilitas saat iradiasi

2

Pengelasan ampul target

- Bahan ampul: kuarsa (quartz) ($T_l = 1610 - 1750\text{ }^\circ\text{C}$)
- Uji kebocoran untuk memastikan ampul kedap dan aman saat iradiasi.



Pengelasan ampul
(quartz)



Ampul target
setelah dilas



Uji kebocoran
(He leak test)

3

Pengelasan inner target

- Bahan inner target: Aluminium (Alloy 6061 dan 1100)
- Berfungsi sebagai wadah pelindung target di dalam ampul kuarsa.



Bahan Aluminium
(6061 / 1100)



Proses pengelasan
inner target



Inner target
setelah dilas

Sifat bahan aluminium

- ✓ Tahan korosi
- ✓ Konduktivitas panas baik
- ✓ Ringan dan kuat
- ✓ Aman terhadap neutron

4

Klasifikasi target

- Klasifikasi target untuk identifikasi dan pengelolaan.
- Pencatatan data posisi letak target di dalam rak iradiasi.
- Penandaan (kikir) pada inner dan outer target untuk penamaan dan traceability.



Penandaan dengan kikir
pada inner dan outer target

Data posisi letak target



Ilustrasi rak iradiasi

Contoh data posisi

ID Target	Posisi Rak	Kolom	Baris	Slot
T-24	R-03	C	07	12
T-25	R-03	D	04	08
T-26	R-04	B	10	06
...	...	...	...	...

Identifikasi target



Inner target



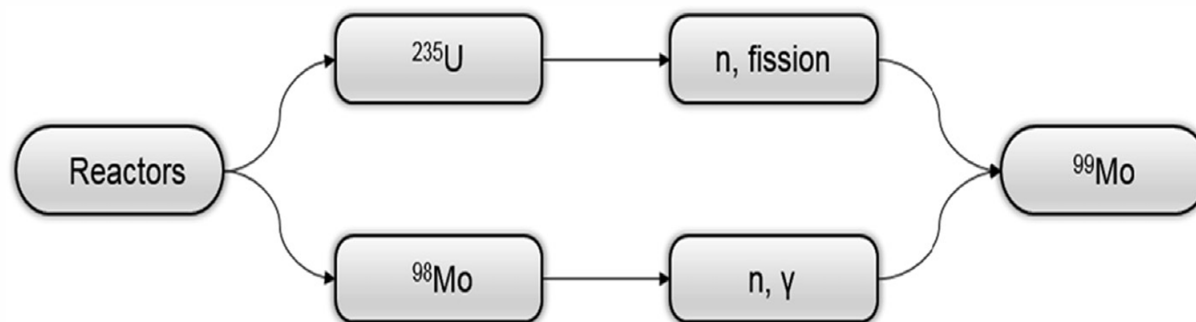
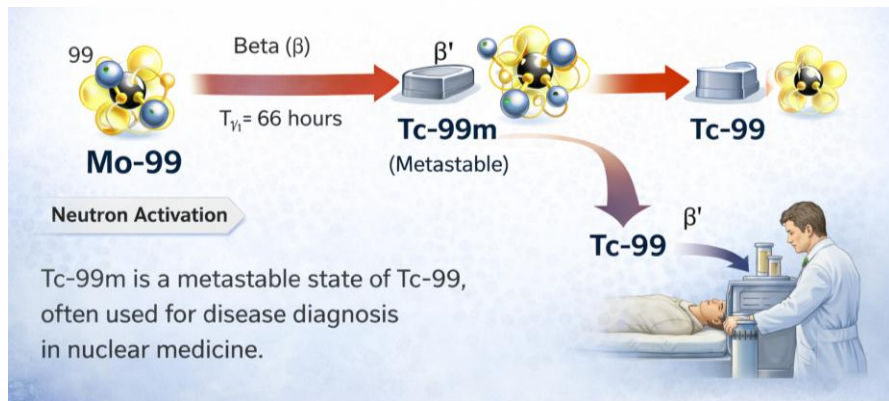
Outer target

Radioisotop Berbasis Reaktor yang diproduksi di RS GAS

No	Radioisotop	Reaksi Inti	Waktu paro	Radiasi	Bahan Target
1	Sm-153	$^{152}\text{Sm} (n,\gamma) ^{153}\text{Sm}$	46,3 jam	β^- (694, 641 KeV) γ (103 KeV)	Serbuk Sm_2O_3 (10 mg)
2	I-131	$^{130}\text{Te} (n,\gamma) ^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$	8.0 hari	β^- (190 KeV) γ (606, 364, 248 KeV)	Serbuk TeO_2 (50 g)
3	Mo-99	$^{98}\text{Mo} (n,\gamma) ^{99}\text{Mo}$	66 jam	β^- (1215 KeV) γ (739 KeV)	Serbuk MoO_3 (4 g)
4	Tc-99m	$^{98}\text{Mo} (n,\gamma) ^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,6 jam	γ (140 KeV)	Generator/Ekstraksi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$
5	P-32	$^{32}\text{S} (n,p) ^{32}\text{P}$	14.3 hari	β^- (1710 KeV)	Serbuk Sulfur (10 g)
6	Ir-192	$^{191}\text{Ir} (n,\gamma) ^{192}\text{Ir}$	73.8 hari	β^- (208, 160 KeV) γ (316, 468, 308.. KeV)	Kawat / disk Iridium
7	Au-198	$^{197}\text{Au} (n,\gamma) ^{198}\text{Au}$	2.7 hari	β^- (961, 285 KeV) γ (411 KeV)	Foil emas (20-30 mg)
8	Lu-177	$^{176}\text{Lu} (n,\gamma) ^{177}\text{Lu}$ $^{176}\text{Yb} (n,\gamma) ^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$	6.7 hari	β^- (496, 175 KeV) γ (208, 112, KeV)	Serbuk Lu_2O_3 (< 1 mg)
9	Ho-166	$^{166}\text{Dy} (n,\gamma) ^{166}\text{Ho}$	26,8 jam	β^- (1773, 1854 KeV) γ (80 KeV)	Serbuk Dy_2O_3 (5 mg)
10	Gd-153	$^{152}\text{Gd} (n,\gamma) ^{153}\text{Gd}$	242 hari	γ (76 KeV)	Serbuk Gd_2O_3
11	Sc-46	$^{45}\text{Sc} (n,\gamma) ^{46}\text{Sc}$	83,3 hari		Serbuk Sc_2O_3

Sistem Target Reaktor

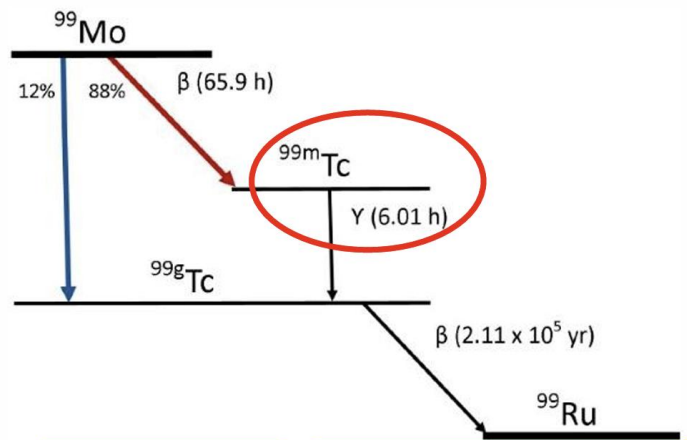
• Produksi Mo-99



Produksi Mo-99 menggunakan reaktor nuklir

Mo-99 dapat diproduksi di reaktor nuklir dengan dua cara yaitu:

1. Melalui reaksi pembelahan inti uranium-235 (U-235)
2. Penangkapan neutron terhadap target MoO₃ baik alam maupun diperkaya Mo-98 hingga >98%



Sistem Target Reaktor

- **Produksi Mo-99 menggunakan target U-235 diperkaya**

- **Penyiapan Target U-235 diperkaya**

- Pencucian wadah iradiasi (tabung SS)
- Proses Pickling
- Pemeriksaan secara Visual
- Pembuatan larutan uranium
- Pembuatan larutan elektroplating
- Proses Elektroplating
- Pemeriksaan kekuatan fisik penempelan
- Proses pirolisa
- Dekontaminasi tabung
- Penutupan tabung
- Pemeriksaan kebocoran tabung
- Pemeriksaan distribusi (profile) uranium

Sistem Target Reaktor

- Produksi Mo-99 menggunakan target U-235 diperkaya



Penyiapan tabung Target U-235 pengkayaan tinggi

Penyiapan wadah target yaitu tabung stainless steel type 304 ukuran panjang $455,61 \pm 1,6$ mm x diameter luar 31,75 mm x tebal 0,889 mm

Proses pickling tabung sasaran

Penyiapan larutan umpan (pelarutan serbuk U-235)

Penyiapan larutan plating

Proses elektroplating

Proses striping dan pirolisa

Penutupan wadah target dengan pengelasan

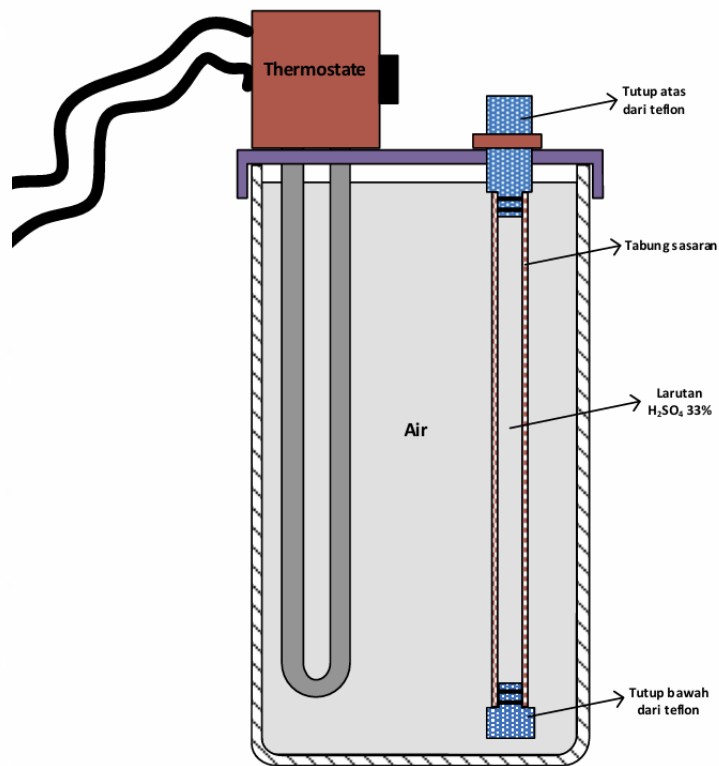
Pengujian kebocoran tabung target dengan sistem uji gelembung (bubble test) dan menggunakan helium leak detector

Pengujian kualitas terhadap tabung target, larutan umpan, larutan plating, larutan limbah plating, larutan striping, dan profile U-235 dan berat target dalam wadah sasaran

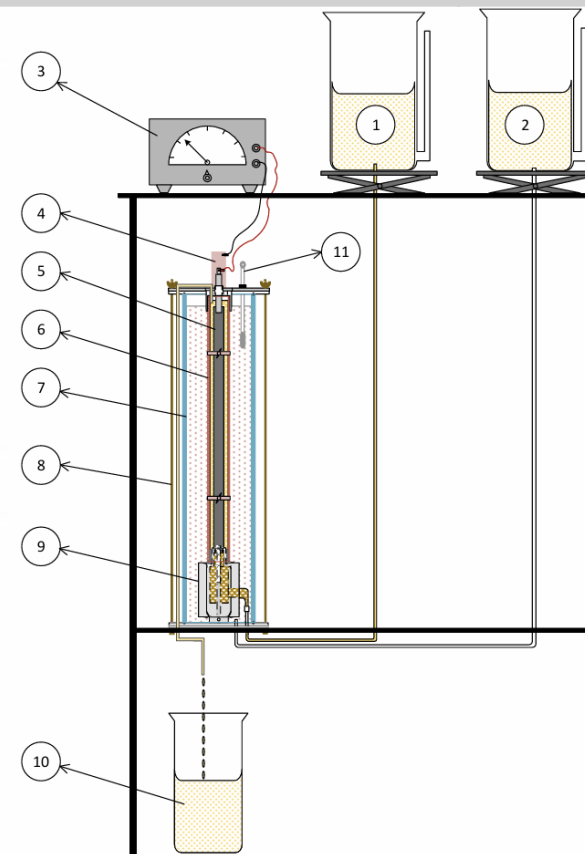
Sistem Target Reaktor

- Produksi Mo-99 menggunakan target U-235 diperkaya

- Proses Plating Tabung Target U-235 Diperkaya



Proses Pikling Tabung Sasaran U-235 Diperkaya



Keterangan :

1. Larutan Plating
2. Air
3. Power Supply
4. Katoda dari stainless steel
5. Anoda dari karbon grafit
6. Tabung sasaran SS 304

7. Water bath
8. Klem water bath
9. Dudukan Tabung Sasaran
10. Larutan Limbah Plating
11. Thermometer

Sistem Target Reaktor

• Produksi Mo-99 Hasil Aktivasi Neutron target MoO₃ Alam

Target yang digunakan untuk pembuatan Mo-99(n,γ) adalah molybdenum alam dalam bentuk oksida (MoO₃) yang diaktivasi dengan neutron. Molibdenum (Mo) alam mengandung isotop-isotop Mo yang kelimpahan dan penampang lintang yang berbeda-beda dan apabila diiradiasi dengan neutron maka akan terjadi isotop seperti pada Tabel berikut.

Isotop	Kelimpahan (%)	Cross section (barn)	Isotop yang terjadi	Waktu Paro (t _{1/2})	Energi Gamma (KeV)
⁹² Mo	14,84	<0,006	⁹³ Mo	3,5x10 ³ th	-
⁹⁴ Mo	9,25	0,016	⁹⁵ Mo	Stabil	-
⁹⁵ Mo	15,92	14,5	⁹⁶ Mo	Stabil	-
⁹⁶ Mo	16,68	1,0	⁹⁷ Mo	Stabil	-
⁹⁷ Mo	9,55	2,2	⁹⁸ Mo	Stabil	-
⁹⁸ Mo	24,13	0,13	⁹⁹ Mo	66 jam	182; 739; 778
¹⁰⁰ Mo	9,63	0,199	¹⁰¹ Mo	14,6 menit	192; 591; 1.010; 506

Mo-98 enriched: kelimpahan 98%

Sistem Target Reaktor

- Produksi Mo-99 Hasil Aktivasi Neutron target MoO_3 Alam



Penimbangan sasaran MoO_3 alam



Pemanasan pada suhu 500 °C selama 1 jam



Pengemasan dalam ampul kuarsa dan penutupan dengan cara pengelasan.

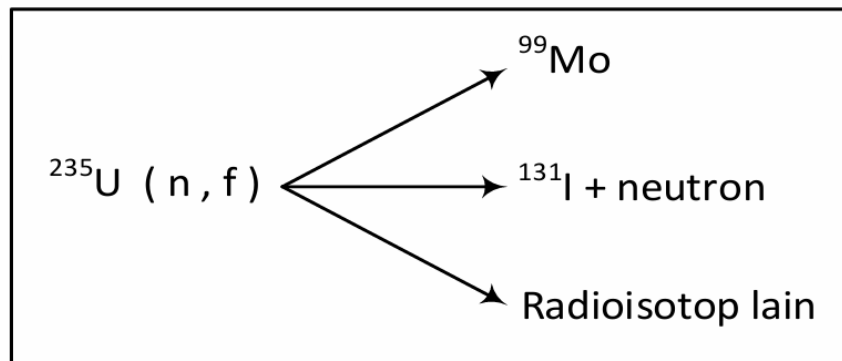


Ampul kuarsa dikemas dalam *inner capsule* dan ditutup dengan pengelasan pada kedua ujungnya kemudian diuji kebocoran dengan sistem gelembung (*bubble test*)

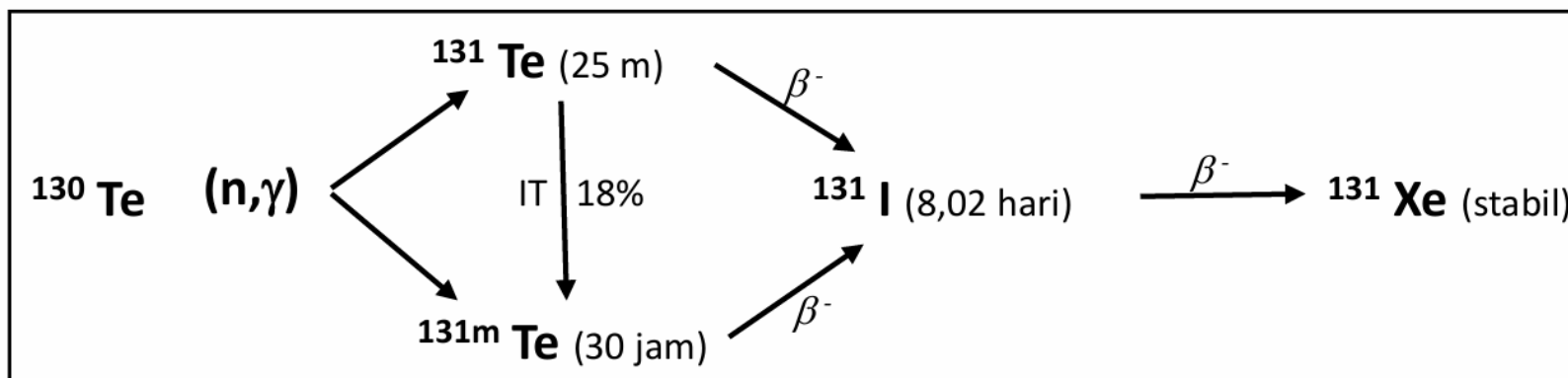
Sistem Target Reaktor

• Produksi I-131

Seperti produksi Mo-99, produksi radioisotop I-131 juga ada dua metode yaitu melalui reaksi pembelahan inti uranium-235 yang dinamakan reaksi neutron-fisi (n,f) dan reaksi penangkapan neutron thermal terhadap target telluriumdioksida (TeO_2) alam melalui reaksi neutron gamma (n,γ)



Proses produksi radioisotop I-131 dari hasil belah U-235 (n,f) termasuk satu rangkaian dalam proses produksi Mo-99 hasil belah U-235 yaitu pada saat proses fase gas dimana I-131 di-trap dalam ***Iodine trap*** dan tinggal diproses lebih lanjut untuk mengambil I-131



Sistem Target Reaktor

- Produksi I-131 Menggunakan target TeO_2 alam melalui aktivasi neutron

Kelimpahan isotop pada telurium alam dan reaksi penangkapan neutron yang terjadi dari sasaran isotop-isotopnya

Isotop	Kelimpahan (%)	Tampang lintang reaksi (barn)	Reaksi nuklir (n,γ)	Isotop yang terbentuk	Energi γ (keV)	Waktu paro
^{120}Te	0,0089	2,000	$^{120}\text{Te} (n,\gamma) ^{121}\text{Te}$	^{121}Te	573	16,78 hari
^{122}Te	2,46	1,700	$^{122}\text{Te} (n,\gamma) ^{123m}\text{Te}$	^{123m}Te	159	119,7 hari
^{123}Te	0,87	406	$^{123}\text{Te} (n,\gamma) ^{124}\text{Te}$	^{124}Te	-	stabil
^{124}Te	4,61	6,800	$^{124}\text{Te} (n,\gamma) ^{125}\text{Te}$	^{125}Te	-	stabil
^{125}Te	6,99	1,55	$^{125}\text{Te} (n,\gamma) ^{126}\text{Te}$	^{126}Te	-	stabil
^{126}Te	18,71	0,135	$^{126}\text{Te} (n,\gamma) ^{127}\text{Te}$	^{127}Te	(β) 698	9,35 jam
^{128}Te	31,79	0,015	$^{128}\text{Te} (n,\gamma) ^{129}\text{Te}$	^{129}Te	(β) 1470	69,6 menit
^{130}Te	34,48	0,270	$^{130}\text{Te} (n,\gamma) ^{131}\text{Te}$ $^{131}\text{Te} \longrightarrow ^{131}\text{I}$	^{131}Te ^{131}I	364	25 menit 8,02 hari

Sistem Target Reaktor

- Produksi I-131 Menggunakan target TeO_2 alam melalui aktivasi neutron

Preparasi Target TeO_2 alam



Ditimbang 50 gram serbuk sasaran TeO_2 alam dan dimasukkan kedalam cawan porselin kemudian dipanaskan menggunakan *oven/furnace* pada temperatur 500°C selama 1 jam



sasaran TeO_2 dimasukkan ke dalam kapsul *inner* dari bahan aluminium yang telah dicuci dengan aceton kemudian ditutup dengan cara pengelasan menggunakan las TIG/Argon



kapsul *inner* tersebut diuji kebocorannya menggunakan alat uji gelembung (*bubble test*)

Sistem Target Reaktor

- Produksi I-131 Menggunakan target TeO_2 alam melalui aktivasi neutron

Preparasi Target TeO_2 alam



Kapsul iradiasi dari bahan aluminium derajat nuklir tipe JIS-1050

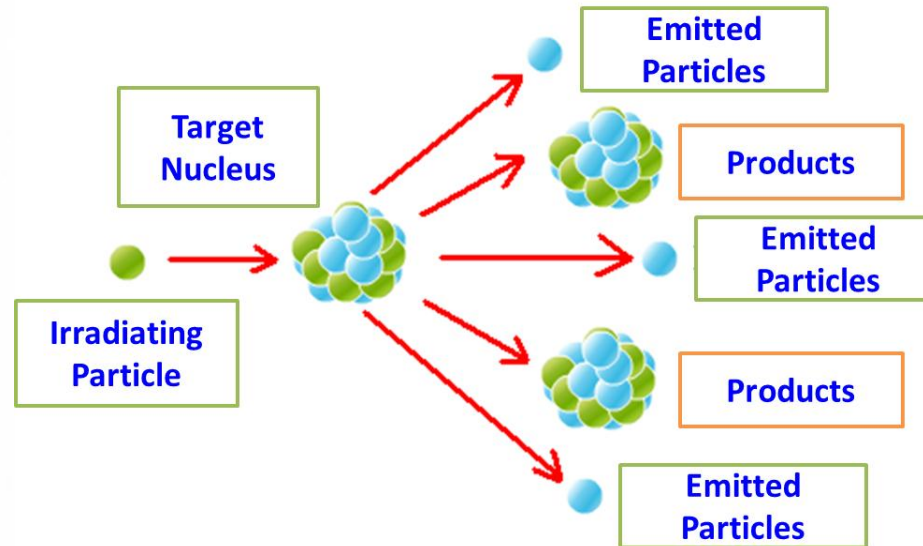


3

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

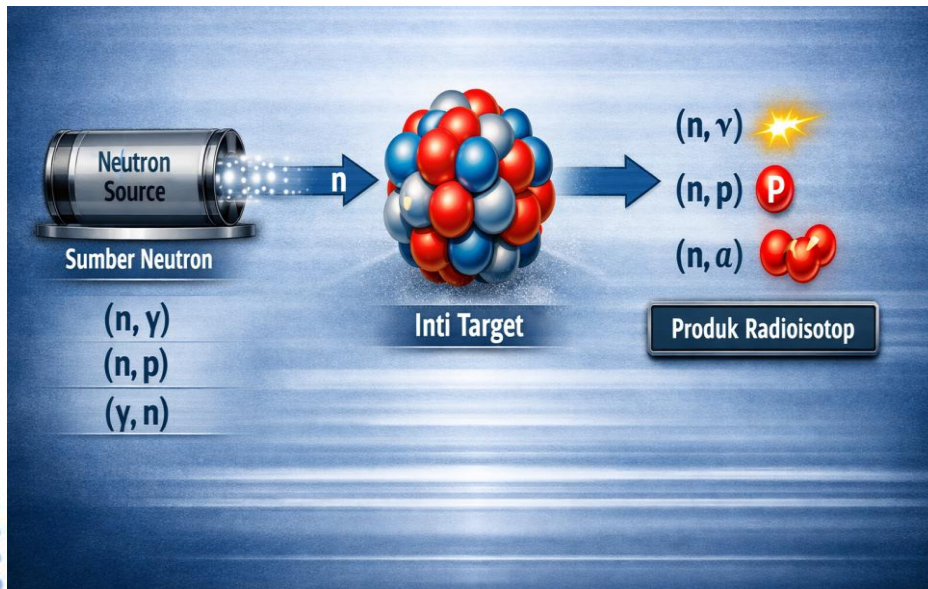
- Klasifikasi Reaksi Inti



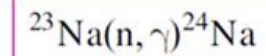
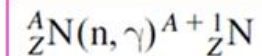
	Partikel	Muatan	Reaksi Inti
Partikel netral	Neutron	0	n,γ ; n,p ; n,α ; $n,2n$; n,f (fission)
	Gamma photon	0	γ,n ; γ,p
Partikel Bermuatan	Proton	+1	p,γ ; p,n ; p,α
	Deuteron	+2	d,p ; d,n ; $d,2n$; d,α
	Alpha	+2	α,n ; α,p

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

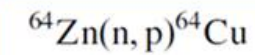
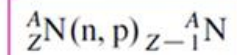
1. Reaksi Inti dengan neutron



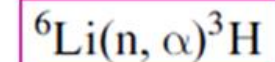
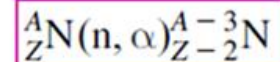
1. (n, γ): Carrier free radioisotope production not possible.



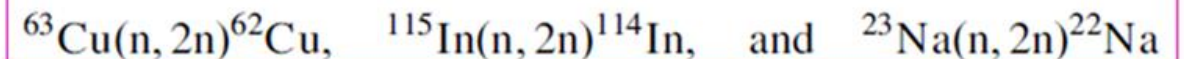
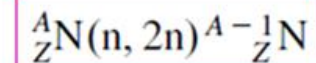
2. (n, p): Carrier free radioisotope production possible.



3. (n, α): Carrier free radioisotope production possible.



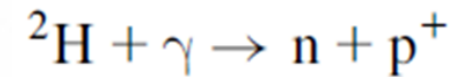
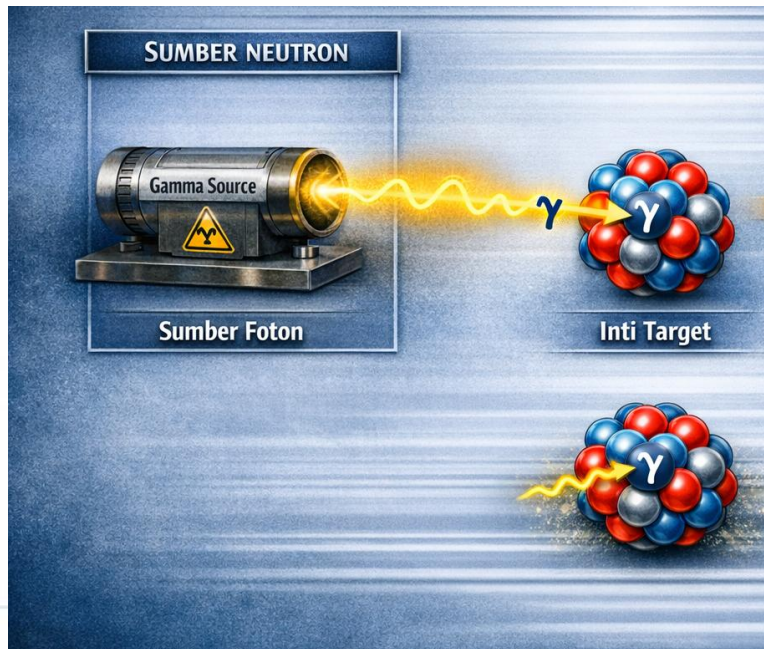
4. (n, 2n): Carrier free radioisotope production not possible.



Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

2. Reaksi Inti dengan Foton

Foton dapat menghasilkan reaksi inti jika energinya lebih besar dari energi ikat inti target. Energi foton yaitu 2,76 MeV. Karena itu, tidak banyak reaksi inti yang dihasilkan dengan reaksi foton

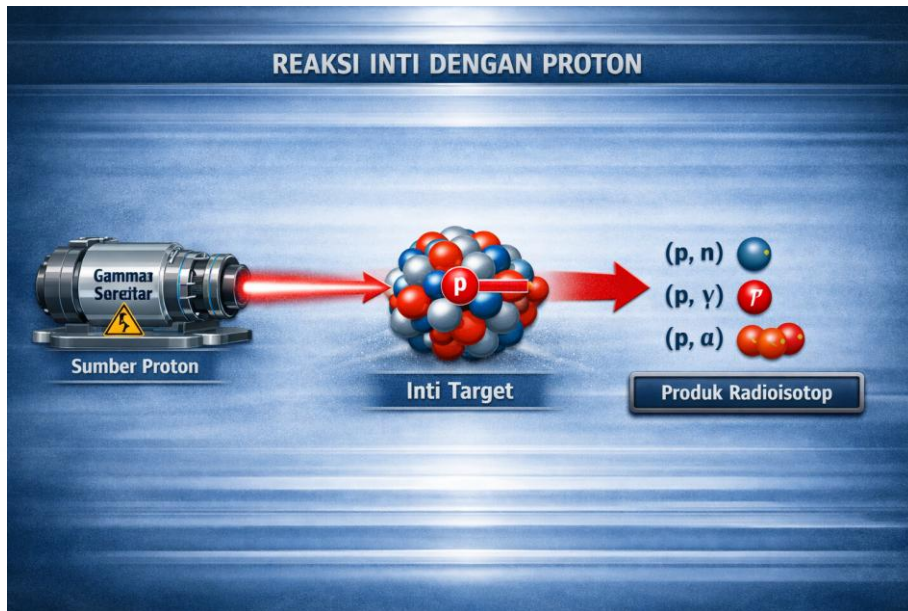


Reaksi tersebut dapat diinisiasi oleh foton yang berasal dari emisi isotop Na-24 dikarenakan energi ikat inti Deuterium adalah 2,2 meV.

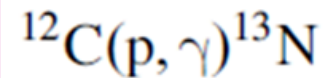
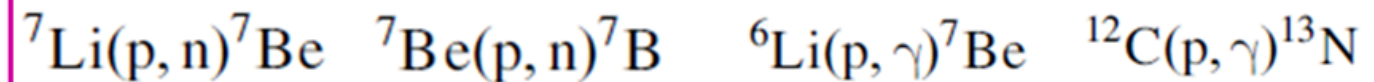
Saat garam Na-24 dilarutkan dalam air berat (D_2O), dapat menghasilkan sumber neutron.

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

3. Reaksi Inti dengan Proton



- Reaksi (p, γ) dan (p,n) relative sederhana karena partikel yg dihasilkan merupakan partikel netral
- Pada reaksi (p,n), jumlah proton meningkat dan jumlah neutron berkurang. Radionuklida produk kaya akan proton
- Pada reaksi (p, α), rasio neutron meningkat
- Akan dihasilkan radioisotope yang bebas pengemban



Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

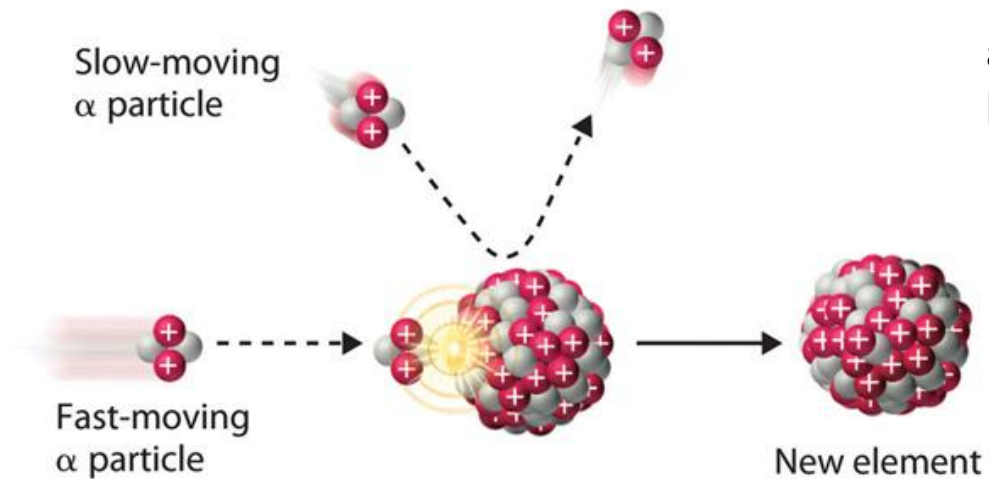
4. Reaksi Inti dengan Deuteron

- Reaksi deuteron penting dalam produksi isotop dengan siklotron.
- Deuteron dapat dengan mudah dipercepat, dan dapat memasuki inti target dari arah neutron, sehingga mengurangi tolakan Coulomb.

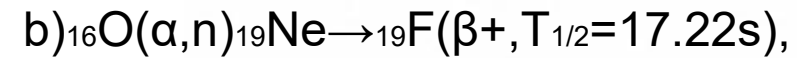
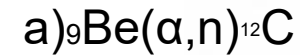
Reactions	(d, p)	(d, n)	(d, 2n)	(d, α)
Similar to	(n, γ)	(p, γ)	(p, 2n)	-
Example	^{23}Na (d, p) ^{24}Na	^9Be (d,n) ^{10}B	^2H (d, n) ^3He	^{88}Sr (d, α) ^{86}Rb
Product Decay	β^-	β^+ / EC	β^+ / EC	β^- / EC
Product	No carrier-free isotope	Carrier-free	Carrier-free	Carrier-free

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

5. Reaksi Inti dengan Alfa



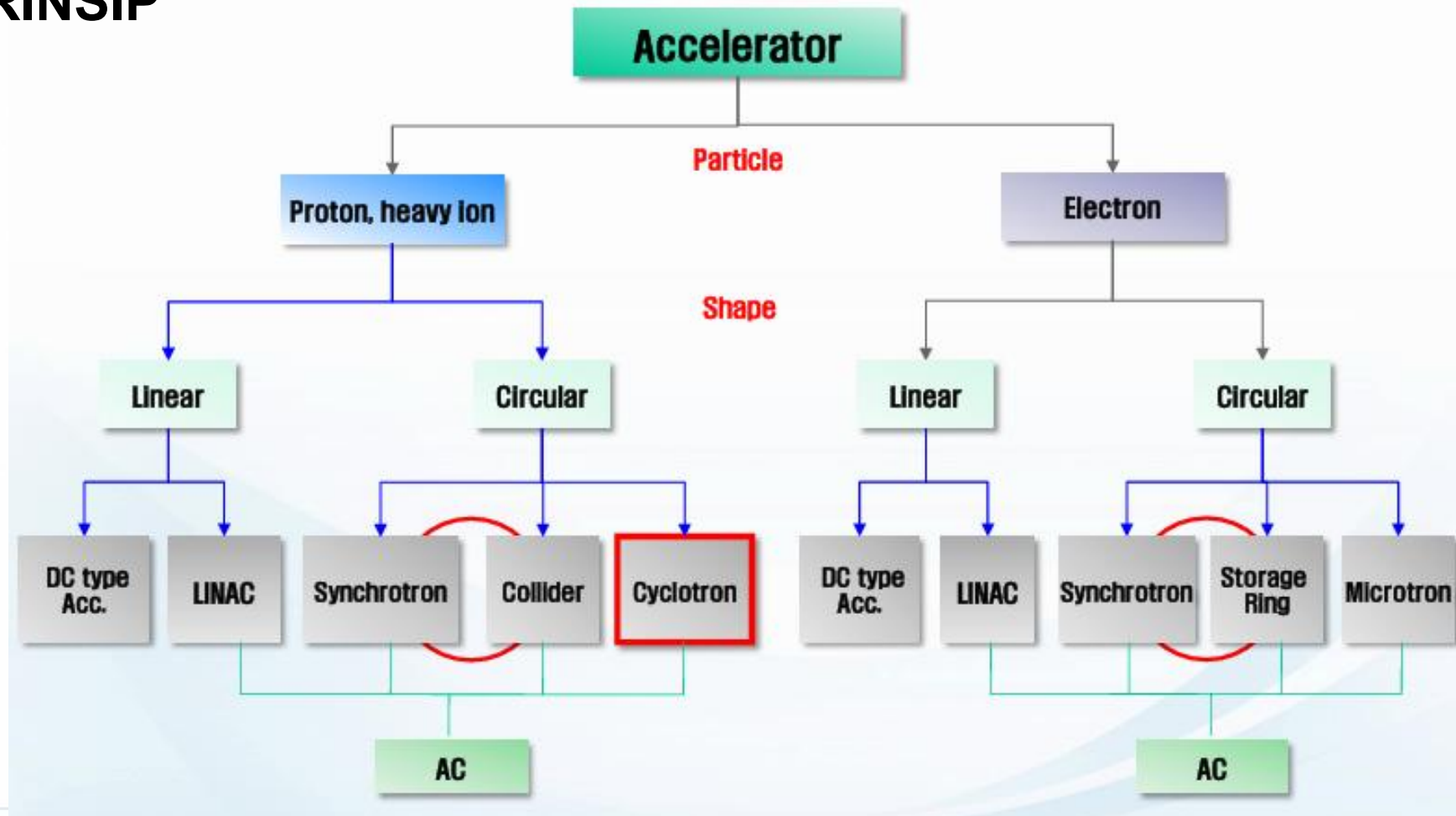
Natural Abundance : ${}^9\text{Be}$ (100%), ${}^{16}\text{O}$ (99.757%)



Nuclear reactions with alpha particles are mainly of three types (α, n) , (α, p) and (α, xn) . The (α, xn) reactions are mainly important in the production of the transuranium elements.

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

PRINSIP



Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

SIKLOTRON
Energi Rendah
< 20 MeV



GE, USA



ACS, Canada



SIEMENS, Germany



HM-10

Sumitomo, Japan

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

SIKLOTRON
Energi
Menengah

30 MeV Cyclotron



IBA, Belgium



ACSI, Canada

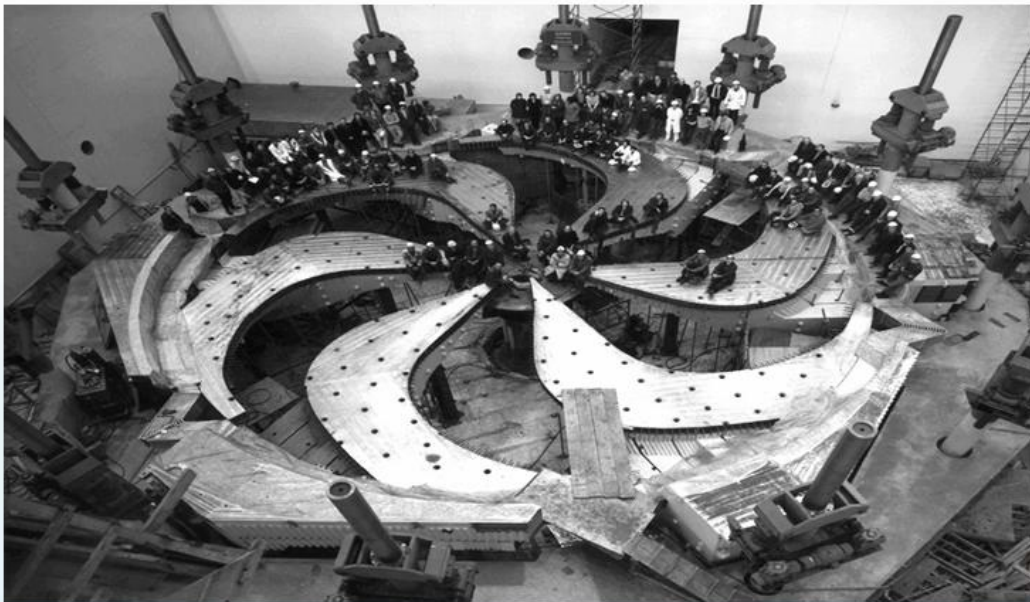


ARTI, KAERI
Developed by KIRAMS

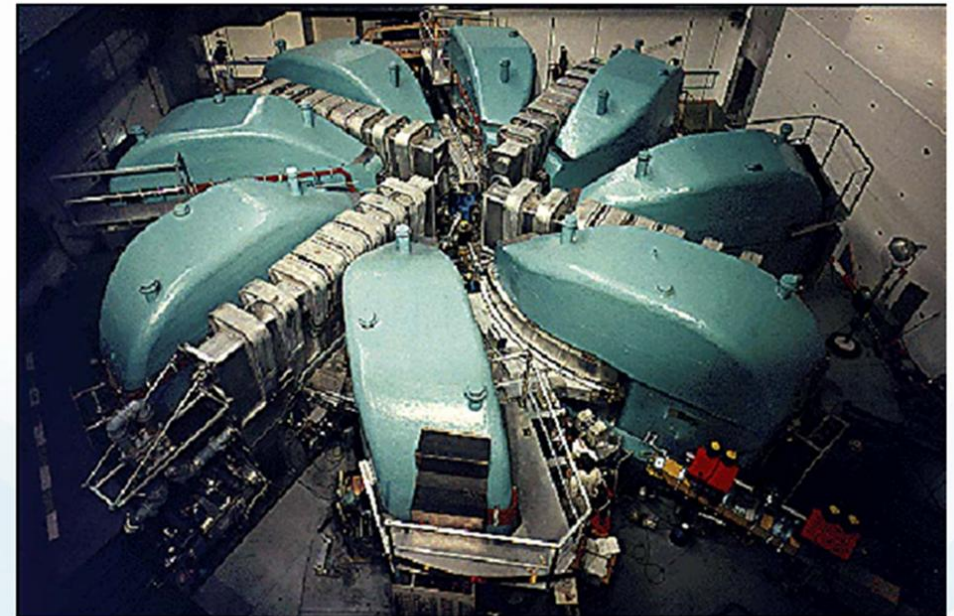
Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

SIKLOTRON Energi Tinggi

Higher-energy Cyclotron



520 MeV Cyclotron Magnet (TRIUMF, Canada)



590 MeV Ring Cyclotron (PSI, Switzerland)

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

Pertimbangan Produksi RI menggunakan siklotron

Suggested by David J. Schlyer

1. Radioisotop jenis apa yg diperlukan?

- PET
- SPECT

2. Informasi apa yang diperlukan untuk produksi RI?

- pita energi,
- tampang lintang,
- bahan target,
- kelimpahan isotop

3. Berkas jenis apa yang digunakan untuk produksi RI

- proton,
- deuteron,
- alfa, dsb

4. Bagaimana pengaruh energi terhadap hasil RI

5. Pengotor apa saja yang mungkin ada?

- dari bahan target: isotop stabil atau RI pengotor;
- dari bahan window atau target body;
- dari proses kimia

6. Bagaimana RI dipisahkan dari bahan target serta pemurniannya?

- pertukaran ion,
- presipitasi,
- kromatografi, dll

7. Bentuk kimia dari RI yang diinginkan

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

Langkah-langkah dalam Produksi RI



1. Pemilihan reaksi inti berdsarakan data *cross-section*: (p,n) , $(p,2n)$, (p,α) , $(d,2n)$, $(\alpha, 2n)$, dll
2. Targetry atau teknologi irradiasi: fabrikasi target, cooling, iradiasi, *beam uniformity*
3. Proses kimia: pemisahan RI dan target, daur ulang unsur diperkaya
4. Kontrol Kualitas

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

1. Pemilihan reaksi inti

Pentingnya Data *Cross-section* Reaksi Nuklir

Data cross section reaksi nuklir adalah data yang mengukur **probabilitas terjadinya suatu reaksi inti pada energi tertentu**. Data ini sangat penting dalam fisika inti dan reaktor nuklir untuk **memahami dan memprediksi perilaku reaksi nuklir**.

<http://www-nds.iaea.org/medical/>

TENDL-2023 Nuclear data library

https://tendl.web.psi.ch/tendl_2023/tendl2023.html

1. Penentuan **range energi optimum** dari suatu proses produksi RI
2. Perhitungan **yield dari radioisotop** yang akan diproduksi, pada ketebalan target tertentu
3. Estimasi pengotor radionuklida (berdasarkan ketebalan target dan pengayaan bahan target)

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

2. Targetry

1. **Jenis Target:** padat, cair, gas

2. **Fabrikasi target:**

- padat: electroplating, pellet, serbuk
- Cair, Gas: target *chamber* dengan foil

3. **Pendinginan target:**

- Pendinginan dengan air: untuk pendinginan target
- Pendinginan dengan He: untuk window

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

3. Proses Kimia

- ☐ Teknik Pemisahan
 1. Pemisahan fisik
 2. Metode pemisahan basah
 - Destilasi
 - Presipitasi dan kopresipitasi
 - Ekstraksi pelarut
 - Kromatografi
 - Reaksi kimia
- ☐ Daur ulang bahan target diperkaya

Produksi Radioisotop menggunakan Siklotron

4. Kontrol Kualitas

1. Kemurnian radionuklida
2. Kemurnian radiokimia
3. Kemurnian kimia
4. Pirogenitas
5. Sterilitas

4 Sistem Target Siklotron

Sistem Target Siklotron

Jenis-Jenis Target

1. Target Padat

- Umumnya logam
- Digunakan pada berkas partikel berenergi tinggi

2. Target cair

- Digunakan untuk produksi radioisotop PET: F-18 (O-18), N-13(O-16)
- Mempertimbangkan kontaminasi

3. Target Gas



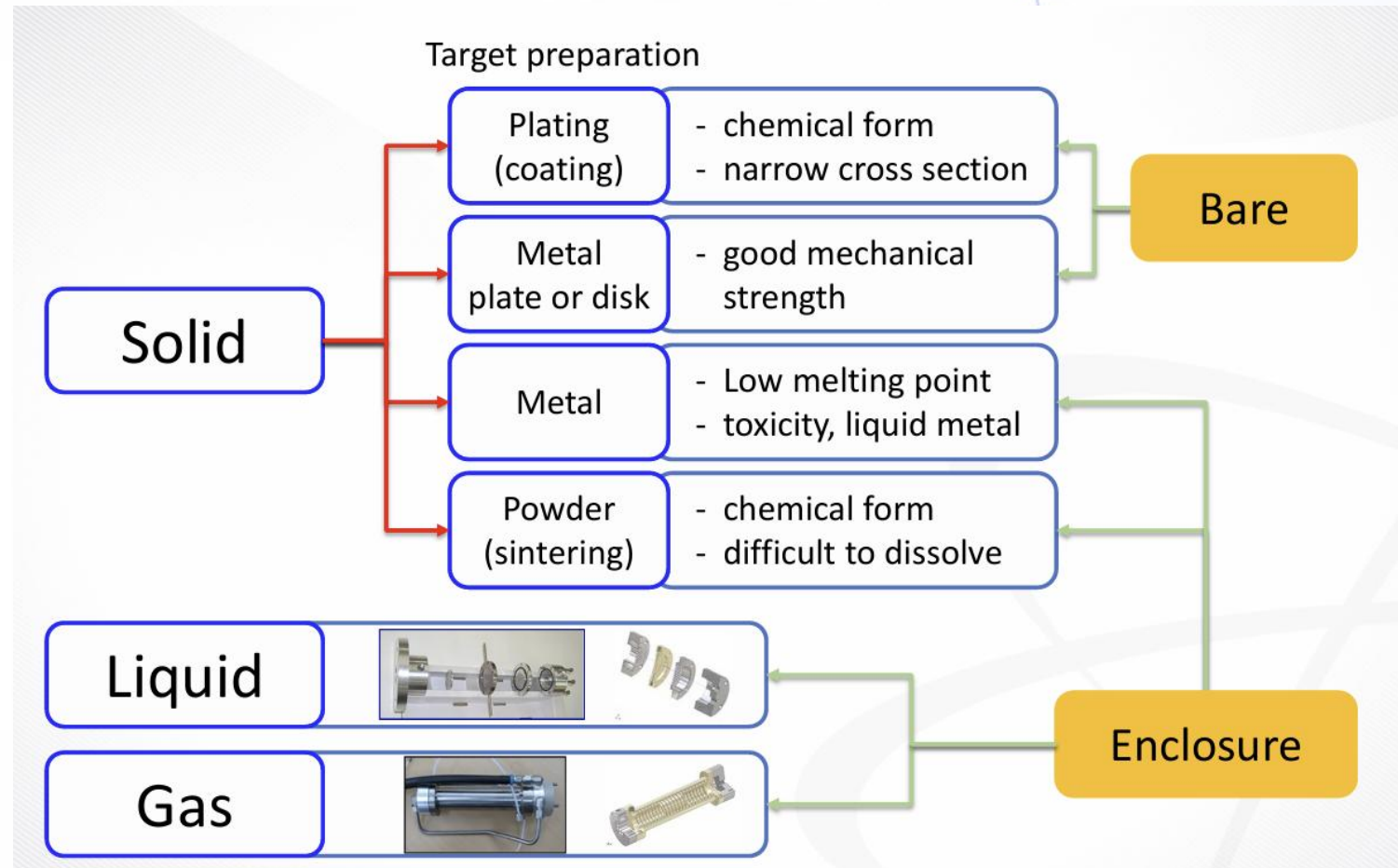
4. Tandem Target Gas-Cair

C-11 dan F-18

Sistem Target Siklotron

Bentuk/konfigurasi Target

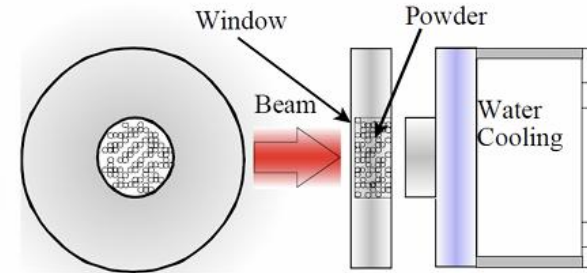
1. Target Tertutup (Enclosure)
 - Umumnya target cair atau gas
 - Khususnya digunakan untuk target padat yang dapat melelehkan atau menguap selama iradiasi
2. Target Terbuka (Bare)
 - Jenis pelat: menggunakan foil logam atau coating logam
 - serbuk padat: serbuk yang disintering atau *sealed powder*



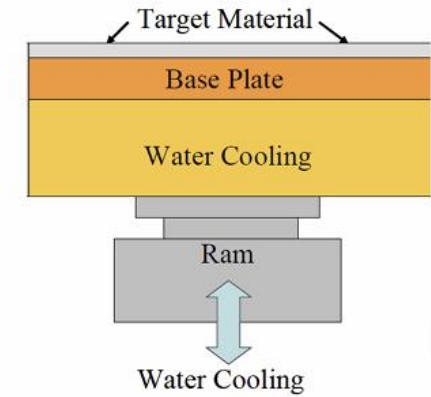
Sistem Target Siklotron

- Target Padat

Sintering or powder



Coating

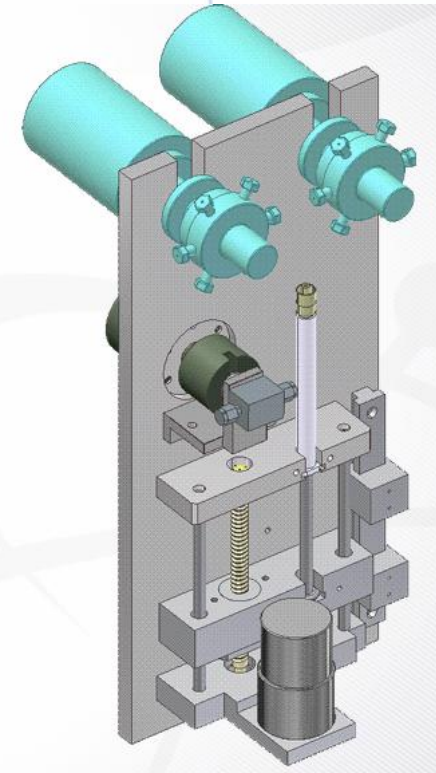
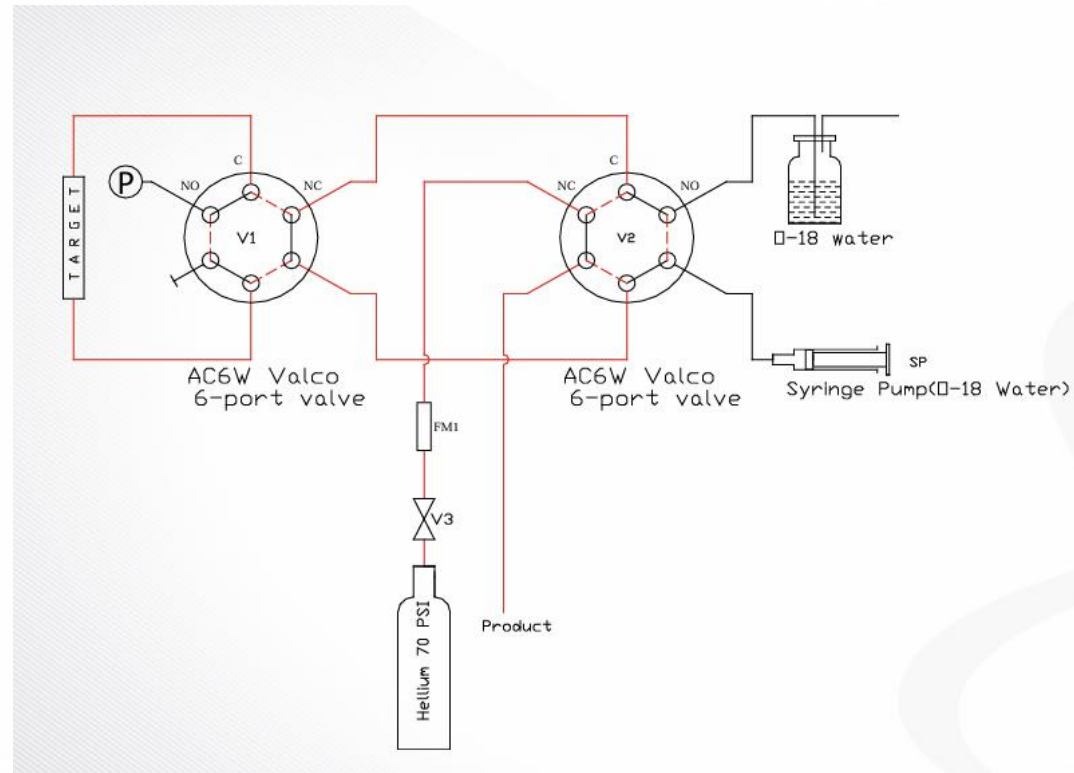


Capsule (enclosure type)



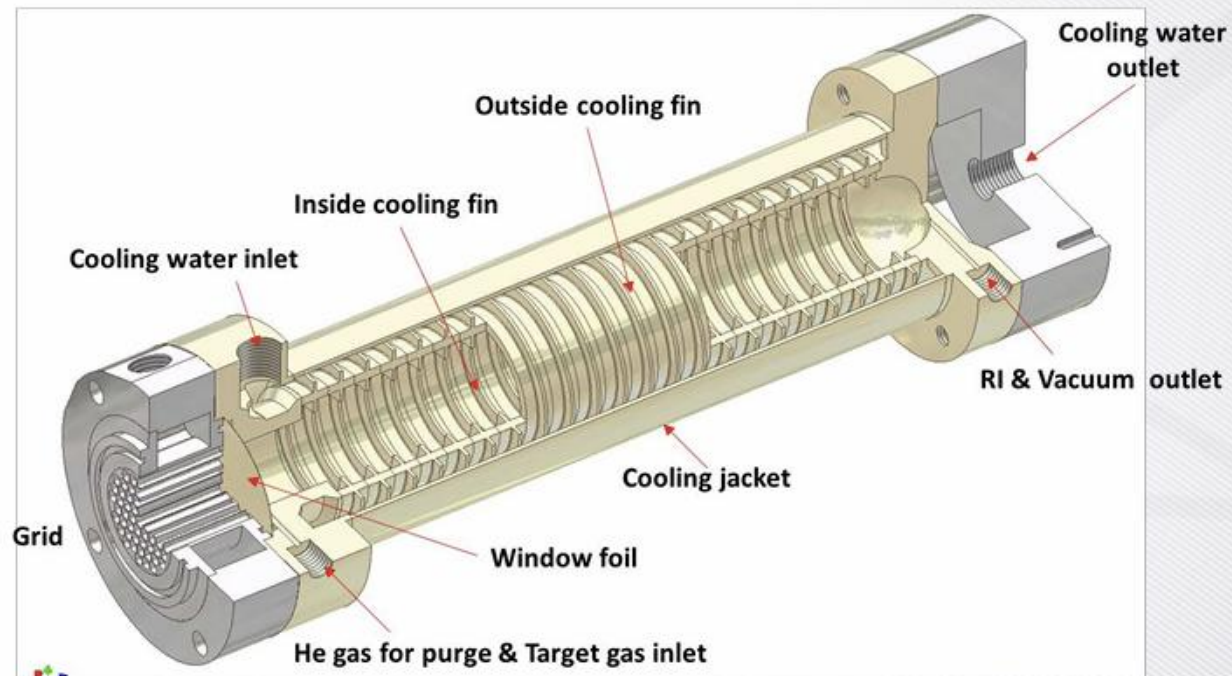
Sistem Target Siklotron

- Target Cair



Sistem Target Siklotron

- Target Gas

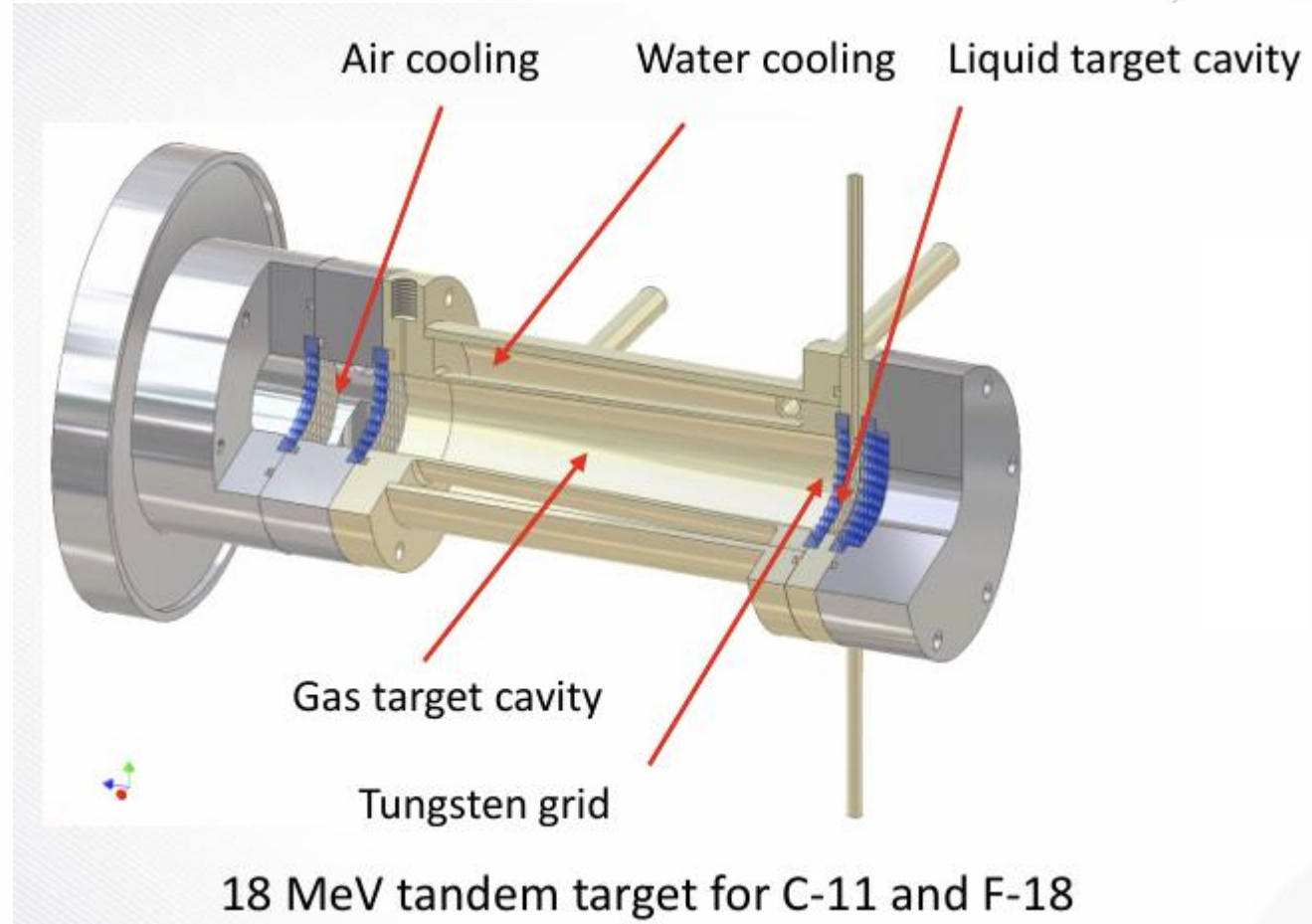


13 MeV target

Sistem Target Siklotron

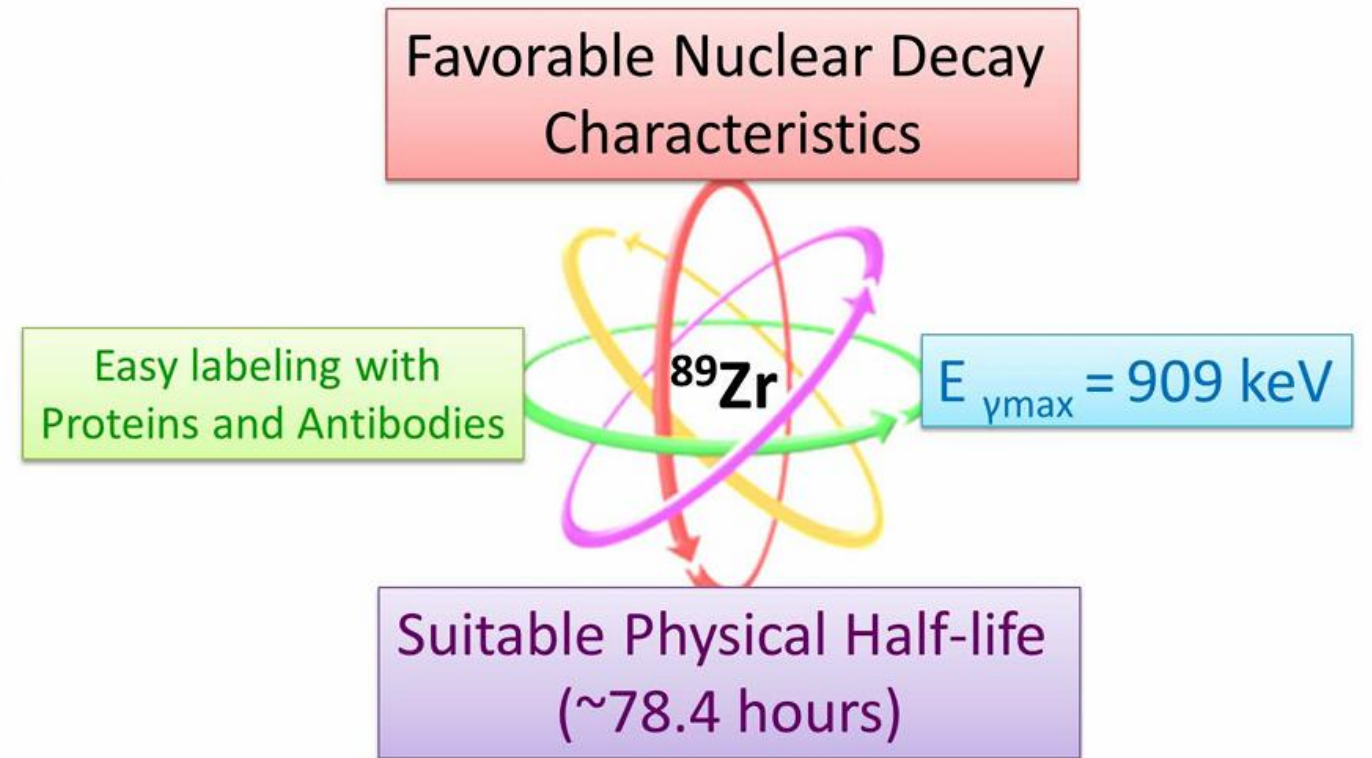
- Target Cair-Gas

Produksi C-11
dan F-18



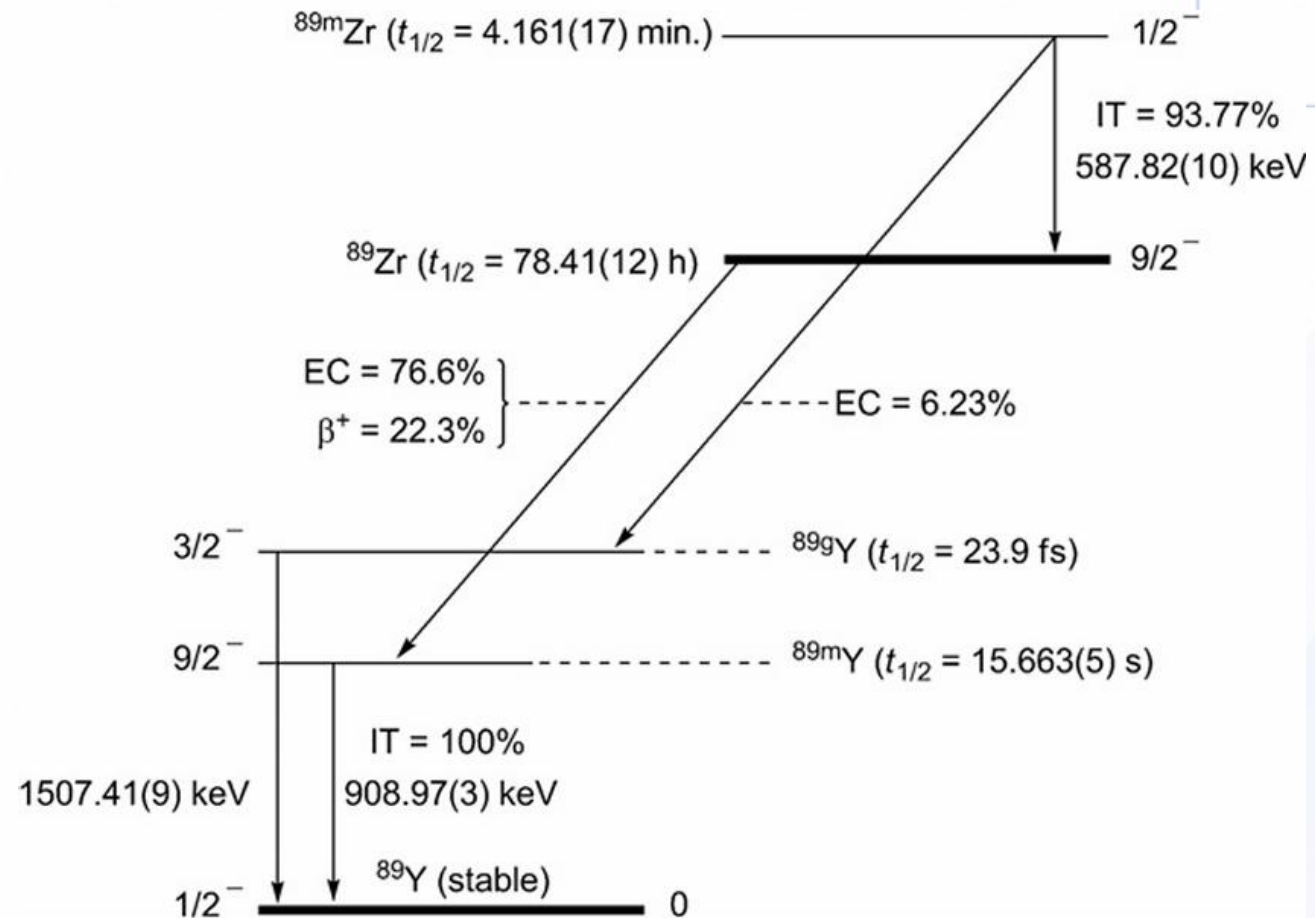
Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Zirkonium-89 (Zr-89) adalah salah satu radioisotop untuk pengembangan agen immuno-PET untuk pencitraan in vivo dari kanker dan radioimmunotherapy



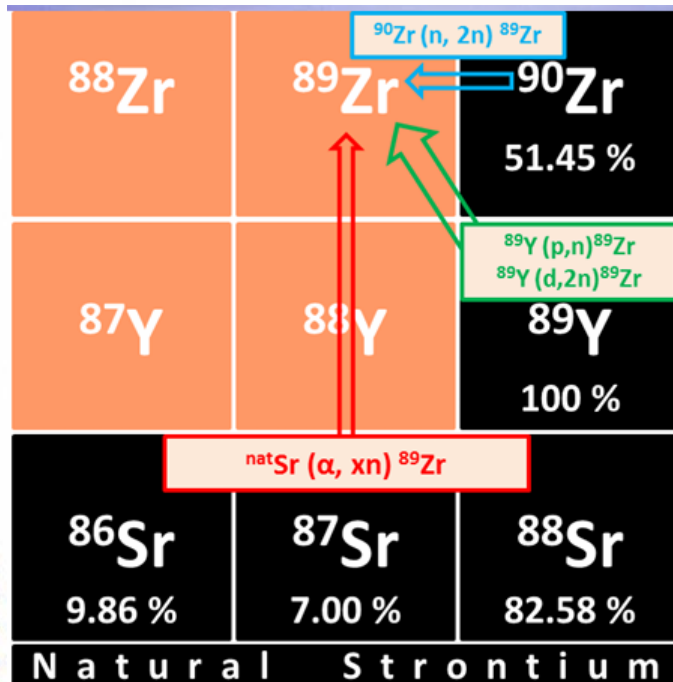
Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Peluruhan Zr-89



Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Skema Produksi Zr-89



Yttrium-89 (^{89}Y) :

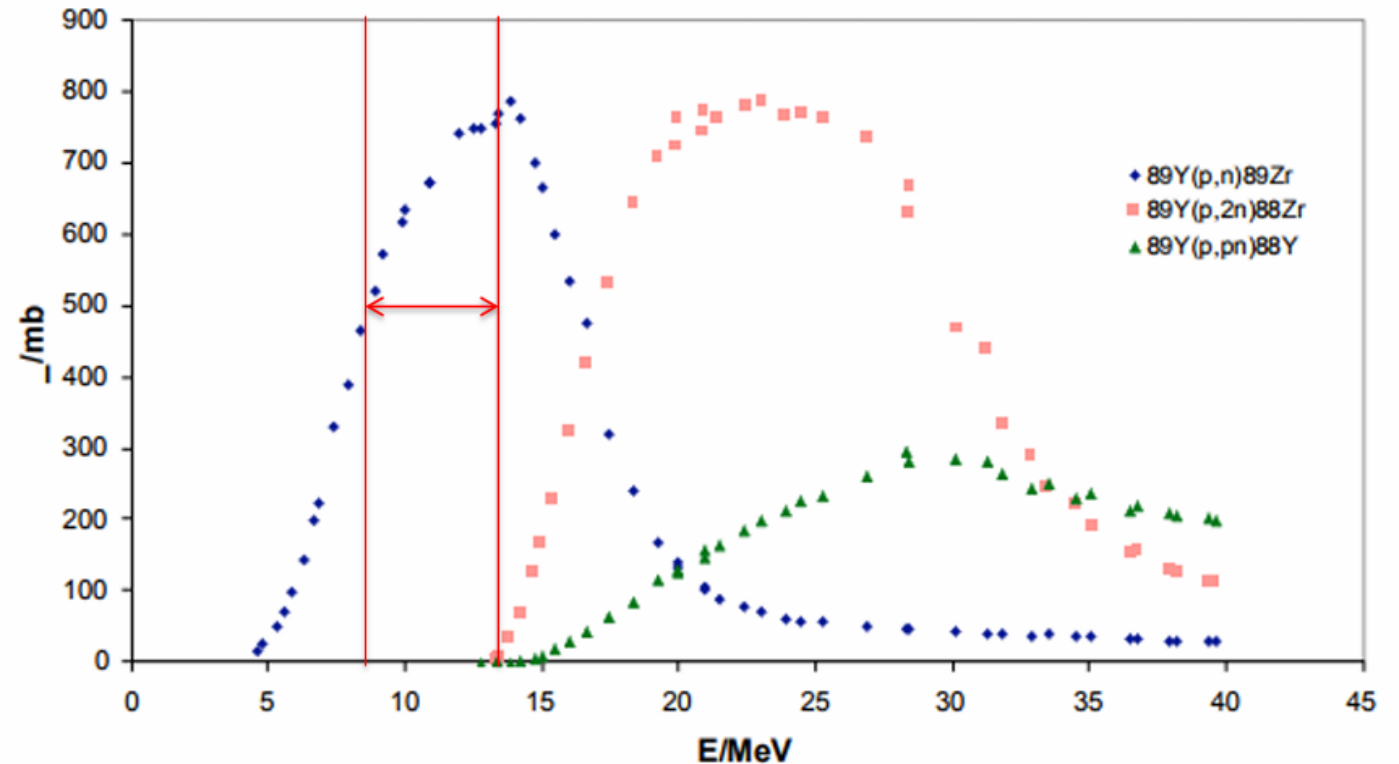
- isotop yg memiliki kelimpahan 100%
- Bahan target yang disukai karena tidak perlu pengayaan bahan target

Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Cross-section Produksi Zr-89

<https://www-nds.iaea.org/medical/>

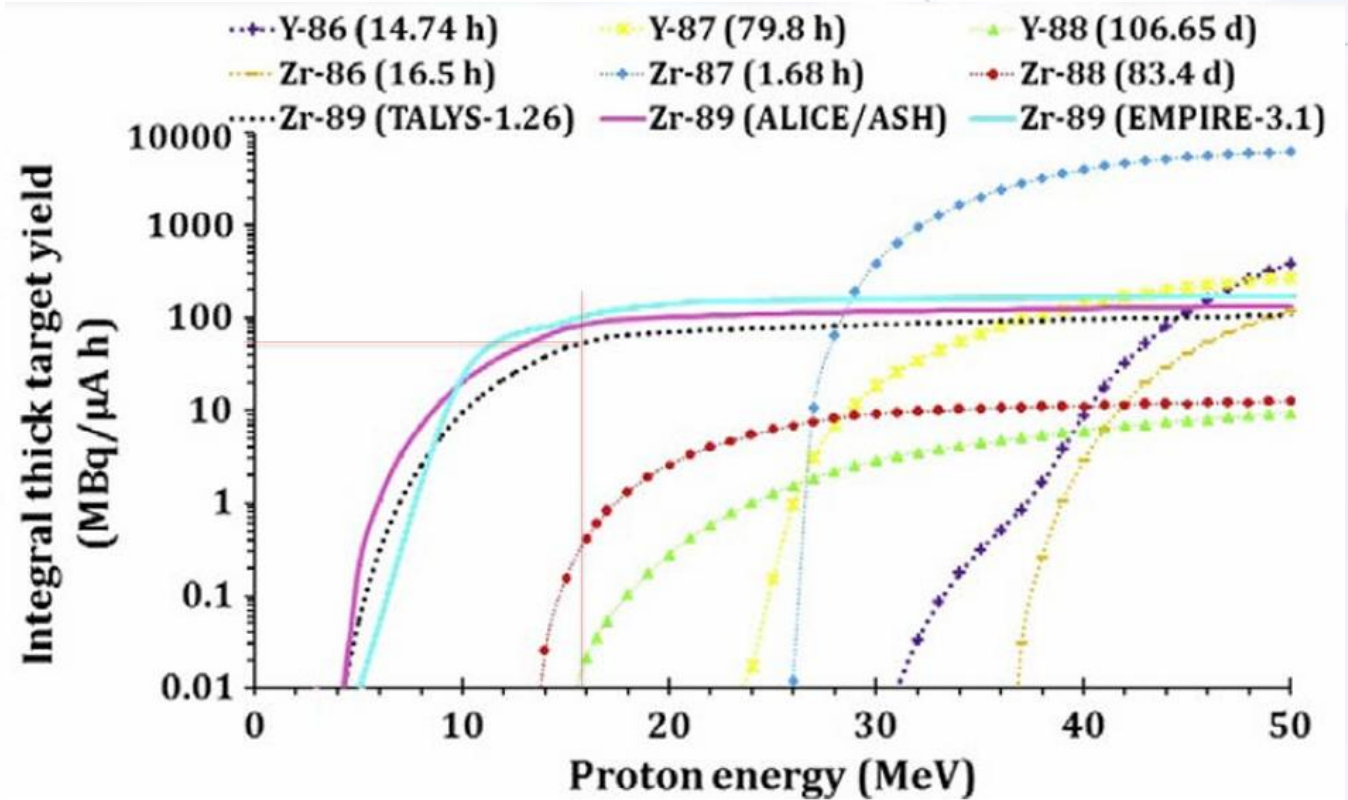
Energi proton optimum untuk produksi Zr-89 dan minimum produksi Zr-88 dan Y-88 adalah di sekitar **8 - 13 MeV**



Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Integral Yield Produksi Zr-89

Integral yield dari reaksi $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ dihitung menggunakan kode TALYS-1.26/, ALICE/ASH dan EMPIRE- 3.1. Yield kontaminasi radio-zirkonium dihitung menggunakan kode TALYS-1.26.



Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Radionuklida Utama pada produksi Zr-89

Karakteristik dan sifat inti dari Radionuklida Utama yang terbentuk selama iradiasi target ^{89}Y oleh proton

Nuclear Reaction	Q-value ^a	Energy Window ^b (E_p)	Product Nuclide	Half Life ($t_{1/2}$)	Principal γ -ray Energies ^c (intensity ^d)
(p, n)	-3.61	12-6	^{89}Zr	78.4 h	909 (100)
(p, 2n)	-12.93	20-13	^{88}Zr	83.4 d	393 (97)
(p, pn)	-11.47	12	^{88}Y	106.6 d	898 (93.7), 1836 (99.2)
(p, α n)	-9.80	12	^{85}Sr	64.9 d	514 (96.4)

a) Q-value- MeV; b) Energy Window: MeV; c) γ -ray Energies: keV; d) Intensity: %

Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Produksi Zr-89

- Bahan Target: ^{89}Y foil (0.5 mm ~ 650 mg)
- Source: Proton
- Beam Energy: 13.5 to 8.4 MeV
- Beam Current: 20 μA
- Waktu iradiasi: 3 jam
- Aktivitas ^{89}Zr saat EOB: ~ 100 mCi

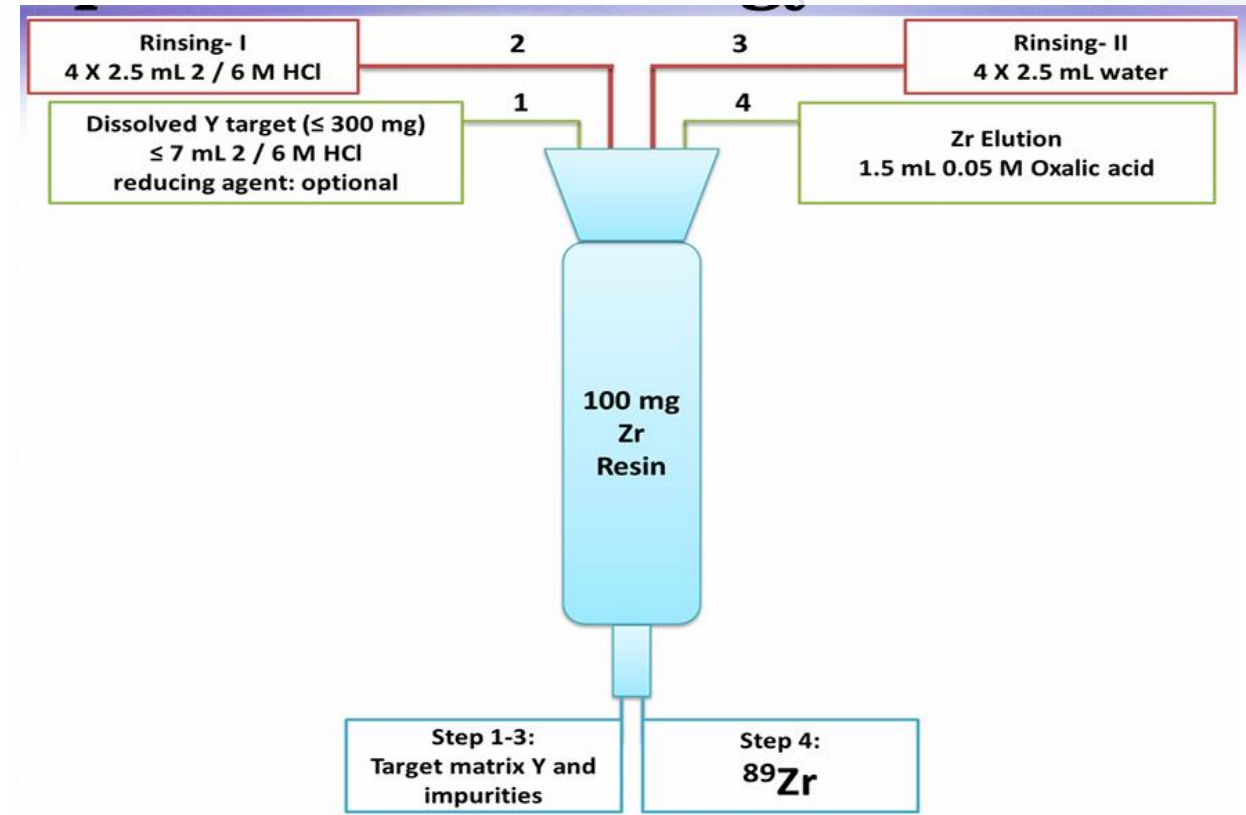
Contoh Produksi Radioisotop Zr-89

Pemisahan Zr-89

Metode:

- Ekstraksi Pelarut:
 1. Di-n-butylphosphate
 2. Trioctyl amine
- Kromatografi Ekstraksi Kation dan Anion
 1. Dowex cation and anion exchange resins
- Pemisahan resin Solid-Phase Hydroxamate Fase Padat

Proses dengan menggunakan resin hydroxamate fase padat merupakan metode yang paling baik dengan recovery aktivitas $^{89}\text{Zr} \geq 98\%$, kemurnian radiokimia dan radionuklida $\geq 99\%$

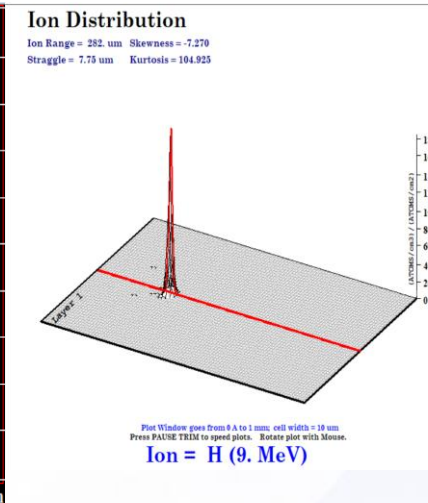
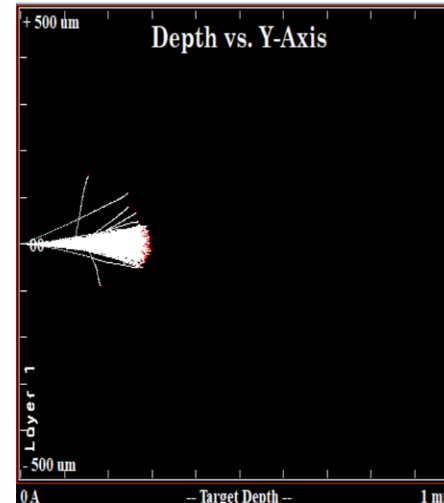
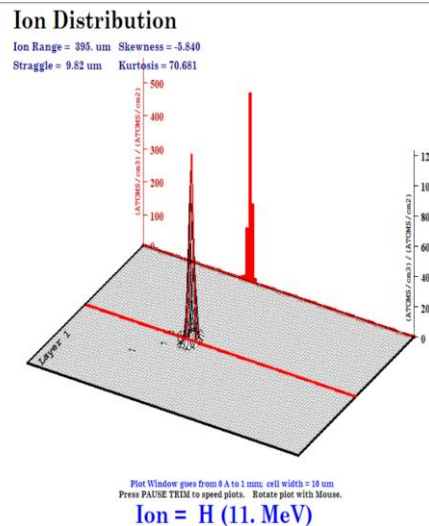
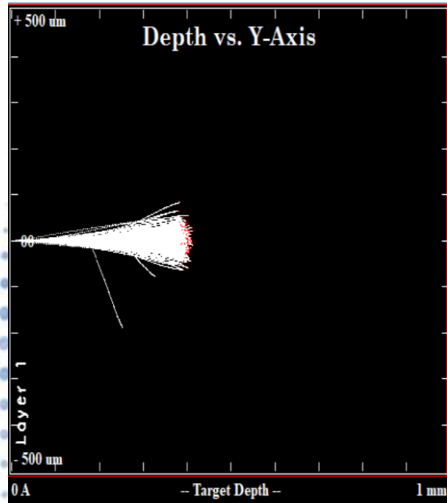
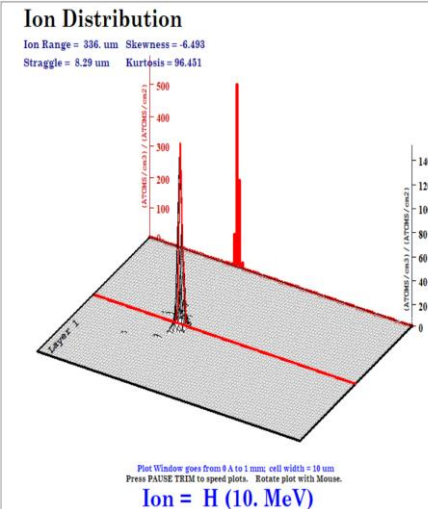
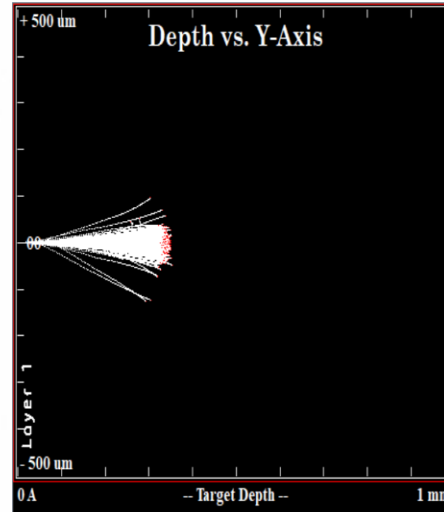
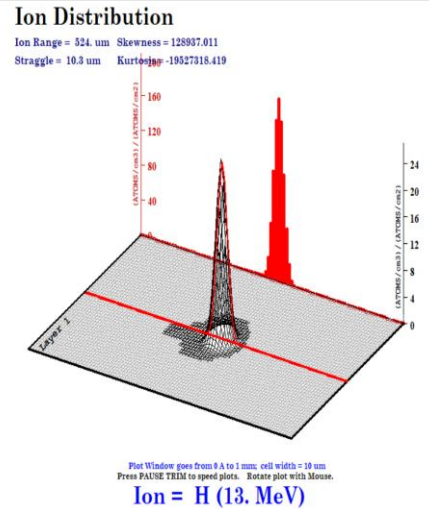
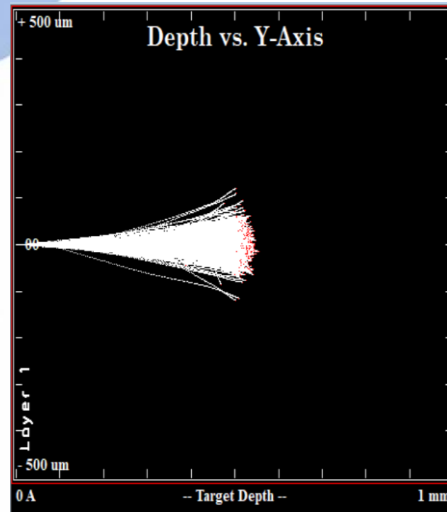


Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

- Menggunakan reaksi $^{68}\text{Zn} (n,p) ^{68}\text{Ga}$
- Bahan Target padat ^{68}Zn (0,5 mm)
- Source: Proton
- Beam Energy: 9 to 13 MeV
- Beam Current: 20 μA
- Waktu iradiasi: 0,5 jam
- Aktivitas ^{68}Ga saat EOB: $\sim 2,11 \times 10^3 - 4,83 \times 10^3$ (MBq/ μAh)

Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

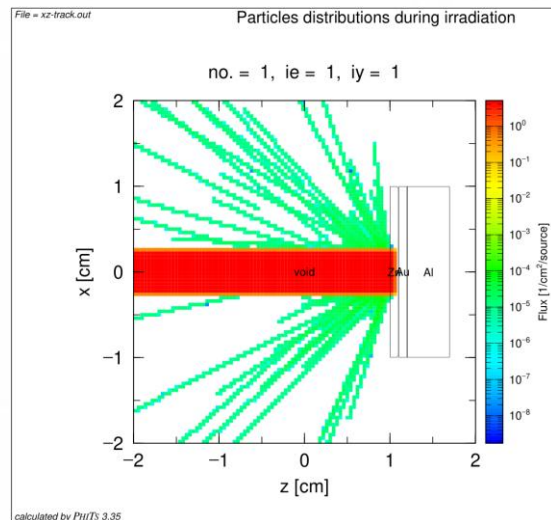
Simulasi SRIM/TRIM: untuk mengetahui penetrasi proton 9 - 13MeV dengan densitas target yang diperoleh



Energi (MeV)	Penetrasi (μm)
13	524
11	395
10	336
9	282

Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

Simulasi PHITS: untuk mengetahui radioaktivitas Ga-68 beserta radionuklida lain yang terbentuk pada hasil iradiasi proton 13MeV (20μA) menggunakan target Zn alam dan Zn diperkaya (98.2%)



Energy P : 13 MeV

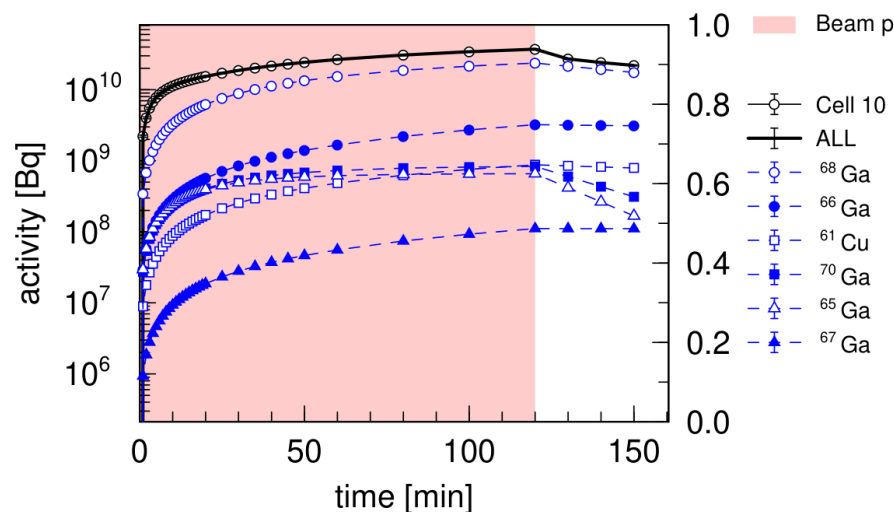
Waktu Iradiasi : 120 menit

Decay : 30 menit

Target Zn(s)

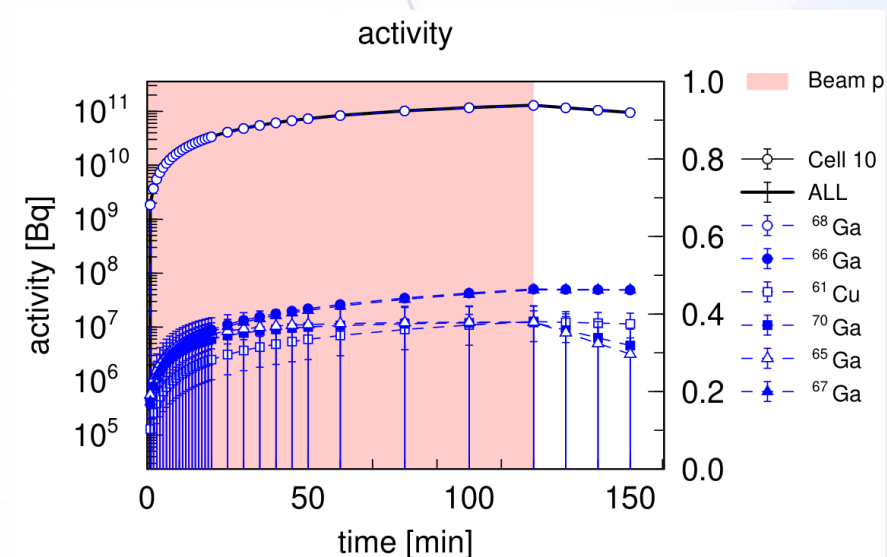
Ga-68 : 470 mCi
KRN : 79.48%

Target Zn alam
activity



dominant nuclides (top 10)				
----- Activity -----				
no.	nuclide	[Bq/cc]	[Bq]	[%]
1	Ga 68	1.7475E+10	1.7475E+10	79.48
2	Ga 66	3.1099E+09	3.1099E+09	14.14
3	Cu 61	7.9242E+08	7.9242E+08	3.60
4	Ga 70	3.1121E+08	3.1121E+08	1.42
5	Ga 65	1.6774E+08	1.6774E+08	0.76
6	Ga 67	1.1060E+08	1.1060E+08	0.50
7	Cu 64	1.7258E+07	1.7258E+07	0.08
8	Ga 64	2.8038E+06	2.8038E+06	0.01
9	Zn 69	3.2485E+05	3.2485E+05	0.00
10	Zn 65	1.5095E+05	1.5095E+05	0.00

Target Zn-68 diperkaya (98.2%)
activity

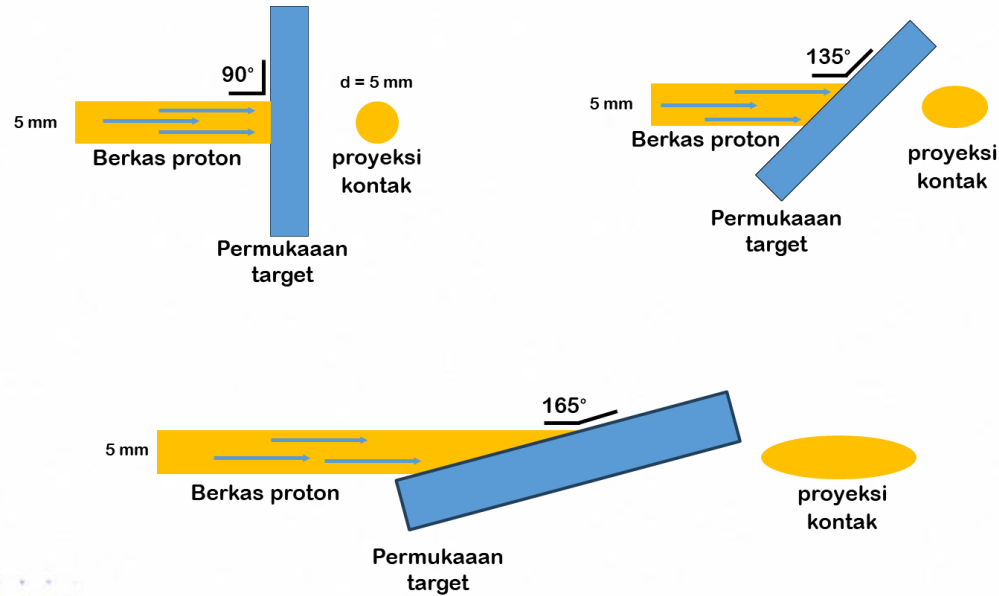


Ga-68 : 2560 mCi
KRN : 99.87%

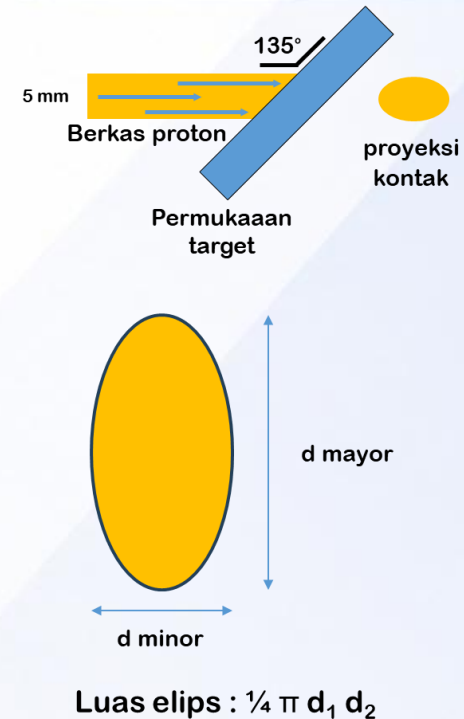
dominant nuclides (top 10)				
----- Activity -----				
no.	nuclide	[Bq/cc]	[Bq]	[%]
1	Ga 68	9.4876E+10	9.4876E+10	99.87
2	Ga 66	4.9077E+07	4.9077E+07	0.05
3	Ga 67	4.8866E+07	4.8866E+07	0.05
4	Cu 61	1.1484E+07	1.1484E+07	0.01
5	Ga 70	4.5767E+06	4.5767E+06	0.00
6	Ga 65	3.1648E+06	3.1648E+06	0.00
7	Zn 69	1.7077E+06	1.7077E+06	0.00
8	Ga 64	5.0067E+04	5.0067E+04	0.00
9	Zn 69m	3.9391E+04	3.9391E+04	0.00
10	Cu 64	1.8437E+04	1.8437E+04	0.00

Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

Desain pada target padat

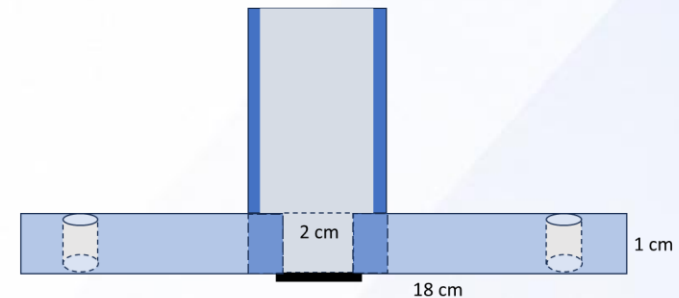
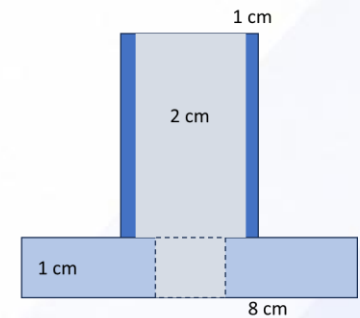
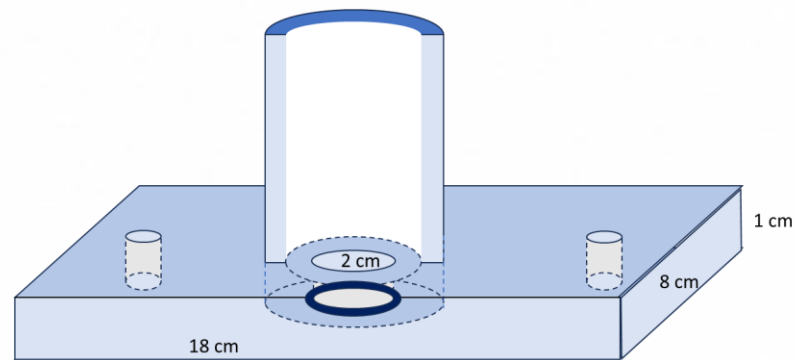
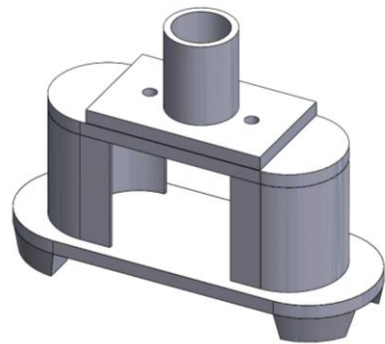
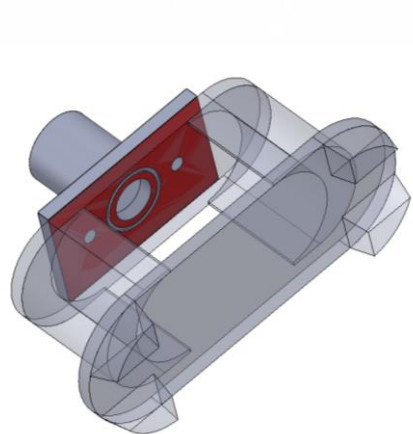
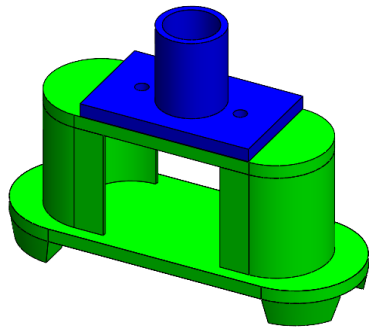
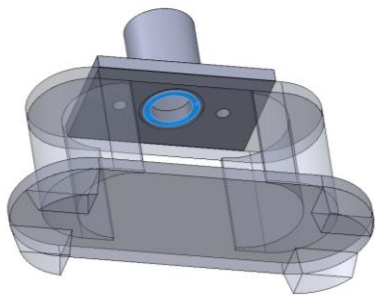


Sudut berkas-target	Diameter Minor (mm)	Diameter Mayor (mm)	Luas Elips Geometris (mm ²)
90	5	5	19.63
95	5	5.03	19.74
100	5	5.08	19.99
105	5	5.18	20.34
110	5	5.32	20.89
115	5	5.49	21.61
120	5	5.77	22.64
125	5	6.11	23.98
130	5	6.54	25.68
135	5	7.07	27.77
140	5	7.76	30.33
145	5	8.65	33.5
150	5	10	39.27
155	5	11.77	46.2
160	5	14.27	56.05
165	5	19.32	75.83
170	5	28.84	113.46
175	5	57.3	225.41



Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

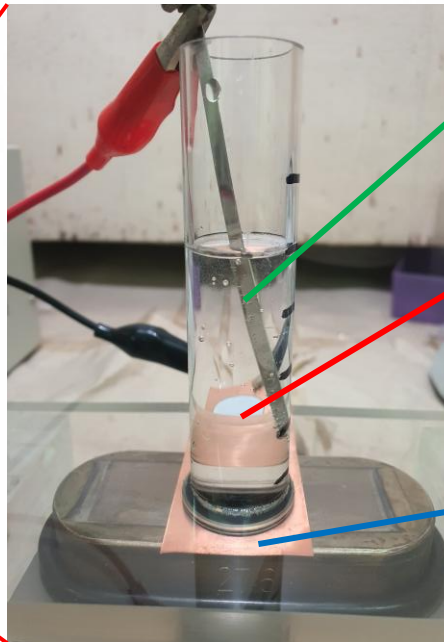
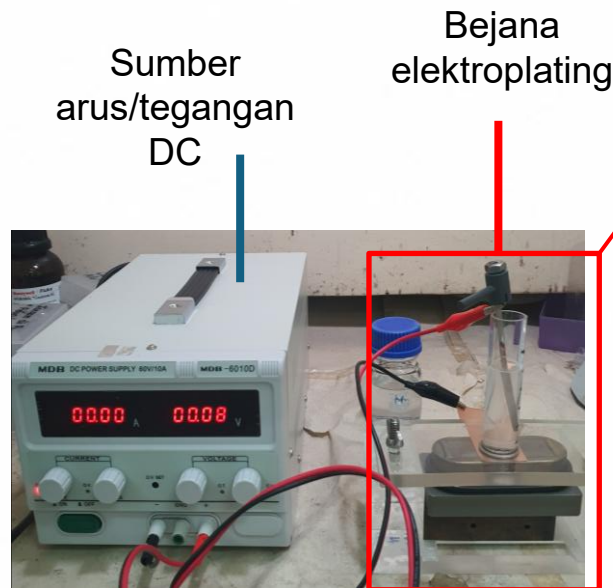
Penyiapan chamber elektroplating target padat.



Desain Chamber Elektroplating

Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

Proses elektroplating target padat.



Anoda (+) Foil Platina :
 $2\text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{O}_2 \text{ (g)} + 4\text{H}^+ \text{ (aq)} + 4\text{e}^-$

Larutan Zn^{2+} 1N

Katoda (-) Foil Tembaga :
➤ $\text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn (s)}$
➤ $\text{H}^+ \text{ (aq)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \text{ (g)}$

Contoh Produksi Radioisotop Ga-68

Penyiapan bahan target menggunakan metode DC Sputtering

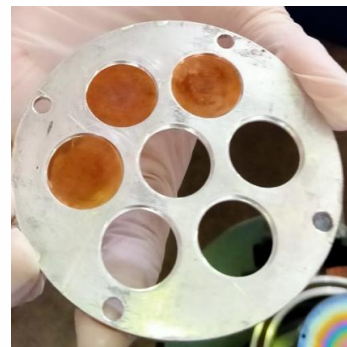
Tahapan

1. Fabrikasi Target ZnO
2. Proses Sputtering
3. Karakterisasi Lapisan

Bahan : ZnO hasil sintering, Gas Argon UHP 99,9%, Substrat logam tembaga (Cu) yang telah dipoles hingga halus.
Alat yang digunakan adalah sistem DC sputtering dengan katoda berpendingin air, Pompa vakum (rotary + difusi), Flow controller gas Ar, Catu daya DC (hingga 10 kV, 100 mA), sistem pendingin berbasis kompresor modifikasi AC 1 PK dengan aliran air sirkulasi, Termokopel digital untuk memantau suhu substrat.



Gambar Alat DC Sputtering



Diskusi :

1. Apakah wujud padat dari target iradiasi untuk fasilitas Reaktor sama pentingnya dengan fasilitas siclotron ?
2. Apakah riset pengembangan produksi radionuklida baru dengan reaktor nuklir masih memungkinkan ?

Kesimpulan

- . Preparasi target iradiasi dimulai dari memilih target iradiasi, menyesuaikan dengan fasilitas iradiasi yang tersedia, menentukan aktifitas teoritis, memudahkan proses pasca iradiasi, mengikuti alur keamanan dan keselamatan penanganan target iradiasi.
- .

Terimakasih