

# Mengenal Fisika Nuklir

Imam Fachruddin

(Departemen Fisika, Universitas Indonesia)

## Daftar Pustaka:

- P. E. Hodgson, E. Gadioli, E. Gadioli Erba, **Introductory Nuclear Physics** (Oxford U. P., New York, 2000)
- J. M. Blatt & V. F. Weisskopf, **Theoretical Nuclear Physics** (Dover Publications, Inc., New York, 1991)
- W. E. Meyerhof, **Elements of Nuclear Physics** (McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989)

# Isi

---

- pendahuluan
  - sifat-sifat inti
  - ketidakstabilan inti ←
  - radioaktivitas
  - model inti
  - gaya nuklir / interaksi kuat
  - fisika partikel
  - astrofisika nuklir
  - akselerator dan detektor
  - reaktor nuklir ←
-

# Ketidakstabilan Inti

Sebagian besar inti tidak stabil, yaitu inti tersebut **meluruh (decay)**, strukturnya berubah, lalu menjadi inti lain.

Contoh inti yang tidak stabil:

inti berat (inti dengan  $A$  besar):  ${}_{92}\text{U}^{238}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{235}$ ,  ${}_{90}\text{Th}^{234}$ ,  ${}_{84}\text{Po}^{218}$

inti ringan (inti dengan  $A$  kecil):  ${}_{1}\text{H}^3$ ,  ${}_{6}\text{C}^{14}$ ,  ${}_{19}\text{K}^{40}$

Secara umum, jika jumlah proton dan neutron sangat berbeda, maka inti tidak terbentuk, atau walaupun terbentuk tidak stabil.

Jumlah inti stabil yang diketahui ada 275 buah, terdiri atas:

166 inti genap-genap ( $Z$  genap,  $N$  genap)

55 inti genap-ganjil

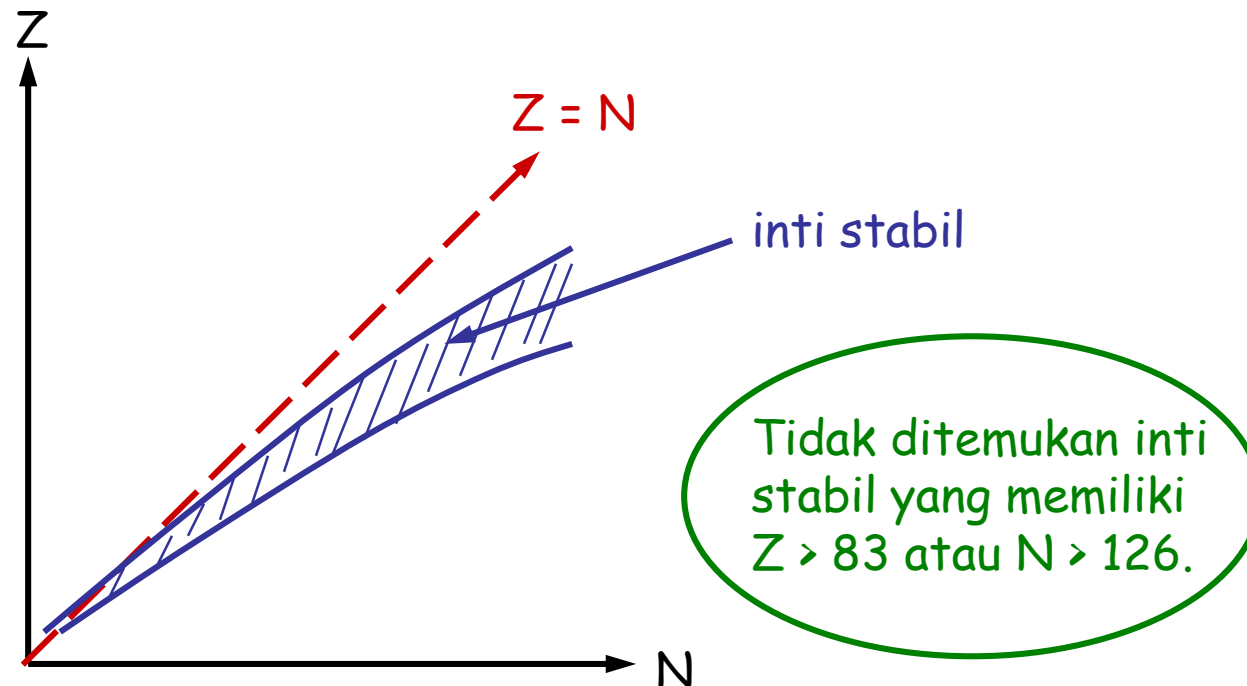
50 inti ganjil-genap

4 inti ganjil-ganjil

Inti dengan  $Z$  dan/atau  $N$  sama dengan magic number lebih stabil dari inti lain pada suatu isobar.

Jika diamati mulai dari inti ringan, inti stabil memiliki proton yang jumlahnya sebanding dengan jumlah neutron. Ketika  $A$  semakin besar, maka jumlah proton  $Z$  pun bertambah, yang berarti gaya tolak Coulomb semakin kuat. Karena itu, inti-inti berat yang stabil memiliki neutron lebih banyak dari proton, supaya memberikan gaya ikat nuklir lebih kuat dari gaya tolak Coulomb, sehingga inti tidak pecah.

(ilustrasi)



# Bentuk Ketidakstabilan Inti

Bentuk ketidakstabilan inti ada dua macam:

1. ketidakstabilan dinamis:

inti pecah secara spontan menjadi dua atau lebih bagian, contoh: **fisi**,  
**peluruhan  $\alpha$**

2. ketidakstabilan beta:

perubahan wujud nukleon: proton  $\longrightarrow$  neutron atau sebaliknya  
(berarti juga perubahan muatan listrik); peristiwa ini disertai  
**peluruhan beta**, **penangkapan elektron (electron captured)\***

\* Elektron orbital diserap / ditangkap oleh inti.

## Ketidakstabilan Dinamis

misal:  $A$  : inti asal

$B, C, \dots$ , dst : inti pecahan

syarat dalam massa:

Jika: massa  $A >$  jumlah massa  $B, C, \dots$ , dst

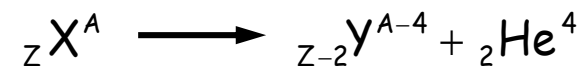
maka:  $A \longrightarrow B + C + \dots$  dst

syarat dalam energi ikat:

Jika: energi ikat  $A <$  jumlah energi ikat  $B, C, \dots$ , dst

maka:  $A \longrightarrow B + C + \dots$  dst

contoh: peluruhan  $\alpha$  (inti memancarkan sinar / partikel  $\alpha$ )

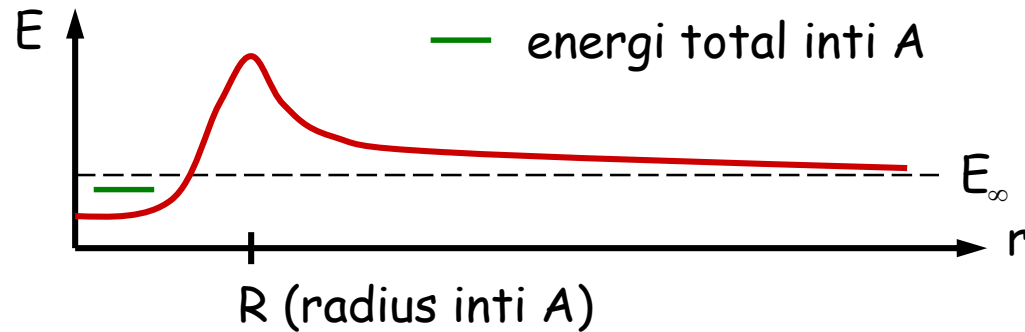


syarat:  $m_X > m_Y + m_\alpha$  atau  $B_X < B_Y + B_\alpha$

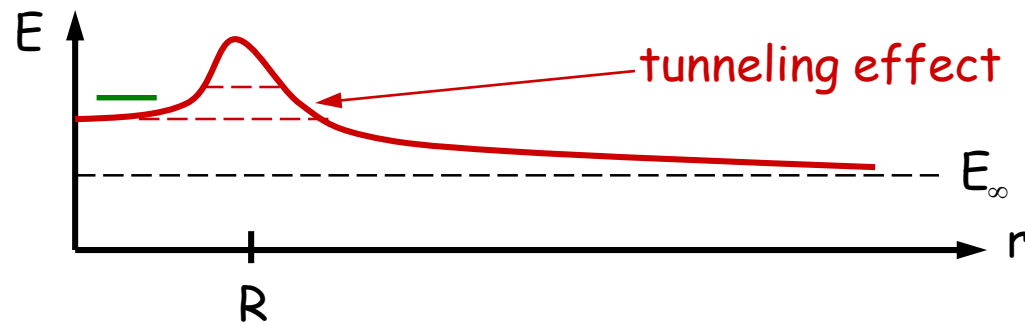
# Penjelasan Kualitatif Ketidakstabilan Dinamis

Ambil suatu proses :  $A \longrightarrow B + C$

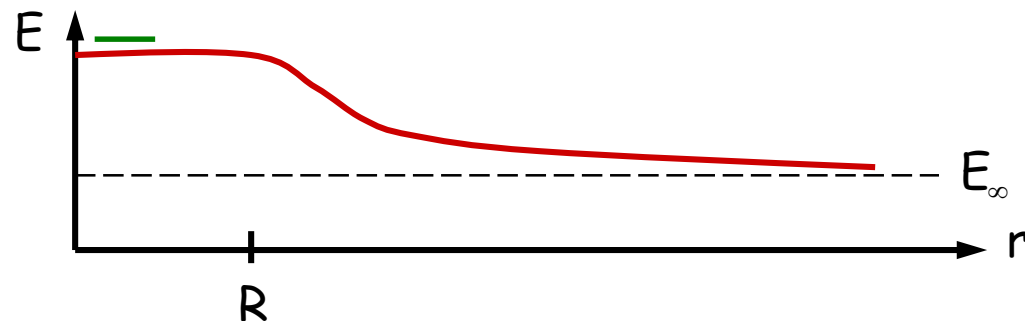
Setelah inti  $A$  pecah, inti  $B$  dan  $C$  berpisah. Kestabilan inti  $A$  bisa dilihat dari energi potensial  $E$  sistem inti  $B$  dan  $C$  itu sebagai fungsi jarak  $r$  antar keduanya (ini hanya penjelasan kualitatif).



inti  $B$  dan  $C$  'terperangkap' dalam inti  $A$ ; inti  $A$  stabil thd proses di atas



inti  $B$  dan  $C$  punya peluang keluar dari inti  $A$  melalui efek terobosan; inti  $A$  tidak stabil thd proses di atas



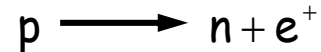
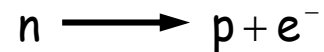
inti  $A$  sama sekali tidak terbentuk, yang ada inti  $B$  dan  $C$  yang terpisah

## Ketidakstabilan Beta

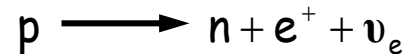
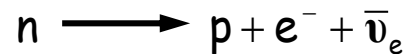
Nukleon dapat berwujud p atau n. Wujud nukleon dapat berubah:



Sesuai hukum kekekalan muatan listrik, proses di atas disertai pemancaran elektron  $e^-$  atau **positron  $e^+$** :



(Antara lain) hukum kekekalan momentum (linear dan angular) menuntut keterlibatan **neutrino elektron  $\nu_e$**  (spin  $\frac{1}{2}$ , massa diam sangat kecil  $< 3$  eV):

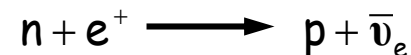


$\nu_e$  = neutrino elektron,  $\bar{\nu}_e$  = anti neutrino elektron

Satu proses lain yaitu, proton di dalam inti menyerap elektron orbital.



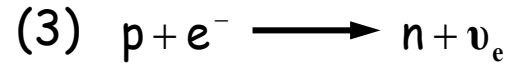
Proses serupa untuk neutron secara teoritis mungkin yaitu:



Namun, proses itu tidak terjadi karena di dalam atom tidak ada positron.



Terdapat 3 proses pada ketidakstabilan beta:



bisakah  
berlangsung secara  
spontan?

Perhatikan nilai massa berikut:

$$m_n = 939,565 \text{ MeV}$$

$$m_p = 938,272 \text{ MeV}$$

$$m_e = 0,511 \text{ MeV}$$

$$m_n - m_p = 1,293 \text{ MeV} > m_e$$

Maka:

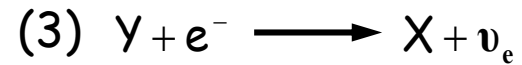
- Proses (1) dapat terjadi secara spontan karena tidak memerlukan energi. Karena itu, tidak ada neutron bebas hidup lama, **waktu hidup rata-rata (mean-life)  $\tau$**  neutron 885.7 detik (< 15 menit).
- Proses (2) dan (3) memerlukan energi, karena itu tidak dapat terjadi secara spontan, sehingga proton bebas stabil. Namun, di dalam inti energi bisa diperoleh dari nukleon lain, sehingga kedua proses itu dapat terjadi secara spontan, tanpa mendapat energi dari luar inti.

Jadi, di dalam inti ketiga proses di atas dapat terjadi secara spontan. Di luar inti hanya proses (1) yang dapat berlangsung secara spontan.

## Ketidakstabilan Beta dalam Inti

Ambil inti  $X(Z,N)$  dan  $Y(Z+1,N-1)$ .

Tiga proses ketidakstabilan beta untuk inti  $X$  dan  $Y$ :



Jika selisih massa kedua inti:

$$\begin{aligned}\Delta_{xy} &= m_x - m_y \\ &= B_y - B_x + m_n - m_p \\ &= B_y - B_x + \Delta_{np}\end{aligned}$$

maka, syarat untuk ketiga proses di atas:

$$(1) \quad \Delta_{xy} > m_e$$

$$(2) \quad \Delta_{xy} < -m_e$$

$$(3) \quad \Delta_{xy} < m_e - \varepsilon$$

dengan  $\varepsilon$  energi ikat elektron (yang semula menempati keadaan kuantum tertentu) dalam atom.

Jika dihitung menggunakan massa atom:

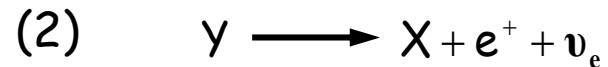
$$M_x = m_x + Zm_e \quad (M_x = \text{massa atom } X, m_x = \text{massa inti } X)$$

$$M_y = m_y + (Z+1)m_e \quad (M_y = \text{massa atom } Y, m_y = \text{massa inti } Y)$$

maka:

$$\begin{aligned} \Delta_{xy} &= m_x - m_y \\ &= M_x - M_y + m_e \end{aligned}$$

sehingga syarat untuk ketiga proses ini:



menjadi:

$$(1) \quad M_x > M_y$$

$$(2) \quad M_x < M_y - 2m_e$$

$$(3) \quad M_x < M_y - \varepsilon$$

# Reaktor Nuklir

Dari grafik energi ikat rata-rata per nukleon atau fraksi ikat terhadap nomor massa dapat dilihat, bahwa jika inti-inti ringan bergabung (fusi) membentuk inti yang lebih berat, maka energi dilepaskan, karena fraksi ikat inti yang lebih berat itu lebih tinggi dari fraksi ikat inti-inti pembentuknya yang lebih ringan. Hal serupa berlaku jika inti berat pecah (fisi) menjadi inti-inti yang lebih ringan, energi juga dilepaskan. Dengan begitu, orang dapat menghasilkan energi dari reaksi inti.

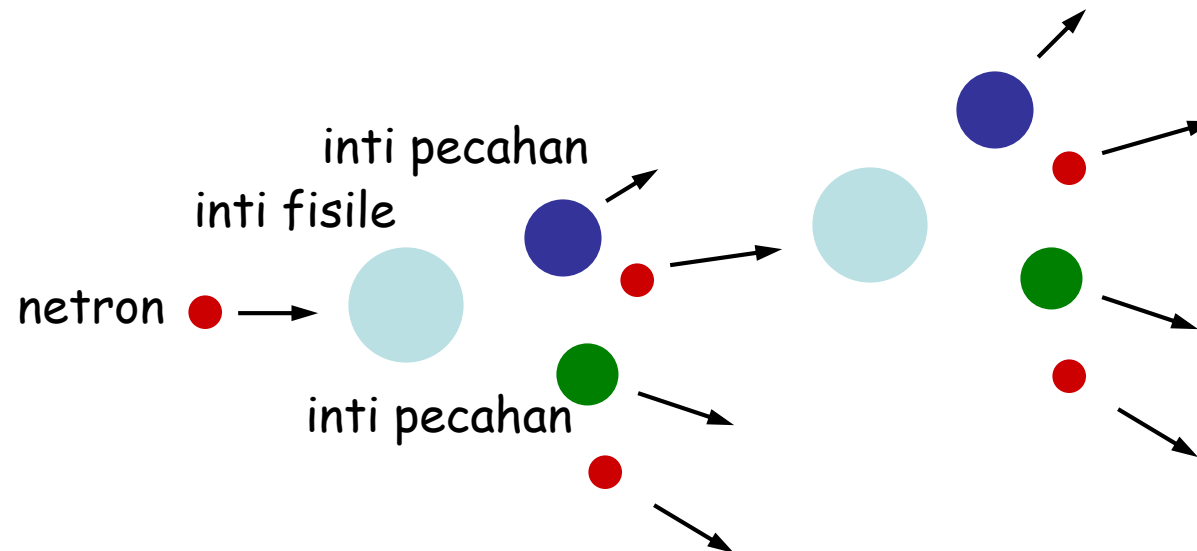
Reaksi fusi terjadi secara alamiah di bintang-bintang, tempat energi dan juga unsur-unsur dihasilkan. Di sana temperatur sangat tinggi, sehingga memungkinkan reaksi fusi terjadi (temperatur tinggi berarti energi kinetik tinggi, sehingga memperbesar peluang partikel-partikel untuk saling berdekatan melewati potensial penghalang Coulomb). Secara buatan reaksi fusi dengan begitu sulit dilakukan.

Reaksi fisi dapat dibuat dan ini dijadikan dasar penciptaan energi dalam reaktor nuklir. Reaktor nuklir pertama dibangun oleh Fermi 1942.

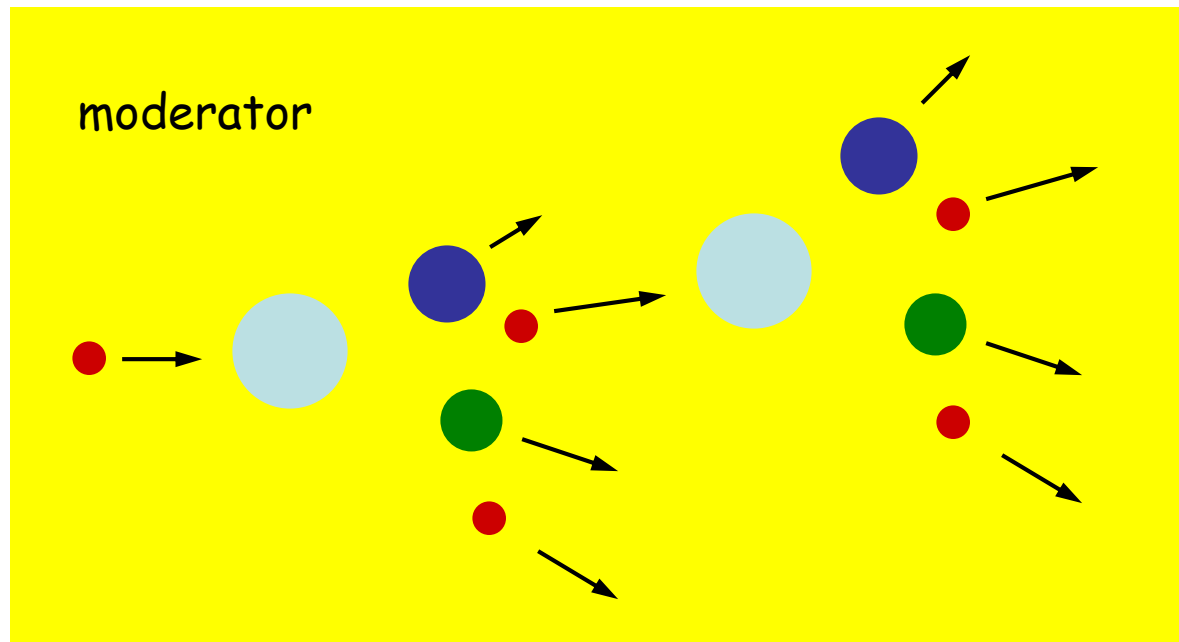
Reaktor nuklir dan bom nuklir sama-sama memanfaatkan reaksi berantai yang menghasilkan energi. Bedanya, dalam reaktor nuklir reaksi itu dikontrol sedangkan pada kasus bom nuklir reaksi itu tidak dikontrol.

Beberapa inti berat akan memecah diri (fisi) jika ditumbuk oleh neutron lambat (neutron thermal), yang energinya kurang lebih 0,025 eV. Inti-inti seperti ini disebut **inti fisile**, contohnya  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ . Ketika pecah inti-inti itu juga memancarkan neutron, yang kemudian menumbuk inti fisile lain, sehingga pecah, demikian seterusnya sehingga terjadi reaksi berantai.

Uranium terdapat di alam, dapat ditambang, karena itu dijadikan pilihan bahan bakar untuk reaktor nuklir. Sayangnya, dalam sejumlah bahan uranium hanya terdapat sedikit saja  $U^{235}$  (sekitar 0,72%), sisanya  $U^{238}$ . Berbeda dari  $U^{235}$ ,  $U^{238}$  tidak bersifat fisile, melainkan menangkap neutron yang datang, sehingga justru mencegah reaksi fisi berantai. Namun meski  $U^{235}$  sedikit, tetap terdapat kemungkinan  $U^{235}$  ditemui oleh neutron dan menjalani reaksi fisi.



Untuk meningkatkan kemungkinan terjadinya reaksi fisi, maka harus diperbanyak jumlah neutron thermal yang datang ke uranium. Mengingat neutron yang dipancarkan oleh inti fisile yang pecah dapat memiliki energi yang tinggi (orde MeV), maka sebelum mencapai uranium neutron ini perlu diperlambat sehingga menjadi neutron thermal. Perlambatan ini dilakukan oleh **moderator**, melalui proses tumbukan. Moderator dapat berupa grafit (karbon), air berat (deterium), air biasa dll. Jadi di dalam reaktor nuklir, batang-batang uranium yang merupakan bahan bakar reaktor dikelilingi oleh moderator, contohnya grafit (karbon), seperti yang dipakai Fermi, air berat (deterium,  $D_2O$ ). Jika bahan bakar uranium itu diperkaya dengan  $U^{235}$  sampai 3%, maka sebagai moderator dapat digunakan air biasa. Jika pengayaan sampai 10% tidak diperlukan moderator.



Terjadinya reaksi fisi itu dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti:

- jumlah neutron yang dipancarkan oleh inti fisile,
- peluang neutron yang dipancarkan inti fisile diperlambat oleh moderator tanpa ditangkap oleh moderator,
- peluang neutron yang sudah diperlambat itu berinteraksi dengan uranium,
- peluang neutron thermal bertemu  $U^{235}$  dan memicu reaksi fisi,
- peluang neutron thermal ditangkap  $U^{238}$ .

Reaksi dalam reaktor nuklir dikontrol dengan mengatur fluks neutron di dalam reaktor, menggunakan **batang-batang pengontrol**. Batang-batang ini terbuat dari boron atau kadmium, yang dapat menangkap neutron, khususnya neutron lambat. Dengan memasukkan atau mengeluarkan batang-batang ini ke atau dari reaktor fluks neutron dapat diatur. Jika diinginkan produksi energi bertambah, maka batang-batang pengontrol ditarik keluar sampai tercapa produksi energi yang diinginkan, lalu dimasukkan lagi supaya produksi energi stabil. Sebaliknya, jika diinginkan produksi energi berkurang, maka batang-batang pengontrol dimasukkan sampai tercapai produksi energi yang diinginkan, lalu ditarik keluar supaya produksi energi stabil.

Reaksi fisi berantai di dalam reaktor nuklir tentu menimbulkan panas yang tinggi. Suhu dalam reaktor bisa mencapai 300 sampai 800 °C. Karena itu, reaktor harus didinginkan, dengan cara mengalirkan cairan pendingin (seperti air pada mesin mobil) di sekitar reaktor. Sebagai cairan pendingin dapat digunakan air bertekanan tinggi, karbondioksida, helium dan sodium cair. Cairan pendingin yang keluar membawa panas dari reaktor. Melalui suatu penukar panas (heat exchanger), panas dalam cairan tersebut tersebut dipindahkan ke cairan lain. Pada akhirnya panas itu dipakai untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Penukar panas itu juga bermanfaat agar bahan-bahan radioaktif yang mungkin terbawa dalam cairan pendingin yang pertama tidak terbawa keluar.

Sebagai pembangkit listrik, satu gram bahan bakar uranium dapat menghasilkan energi listrik 1 MWatt.hari. Ini sebanding dengan energi listrik yang dihasilkan oleh 2,5 ton batubara.

Setelah sekian waktu jumlah uranium di dalam bahan bakar reaktor tentu berkurang, karena menjalani fisi menghasilkan energi, neutron dan inti-inti lain. Karena itu, bahan bakar ini harus diganti. Bahan bakar yang telah terpakai tidak dapat dibuang begitu saja, karena mengandung bahan-bahan radioaktif, yang waktu paruhnya bervariasi, dari sepersekian detik sampai ribuan tahun. Setelah sisa uranium dipisahkan (untuk dimanfaatkan lagi), sampah ini disimpan melalui penyimpanan yang bertahap. Pertama-tama disimpan sampai radioisotop yang berumur pendek jauh berkurang, kemudian dipindahkan ke penyimpanan berikutnya, terakhir untuk disimpan di dalam tanah dalam wadah baja.