

REAKSI NUKLIR

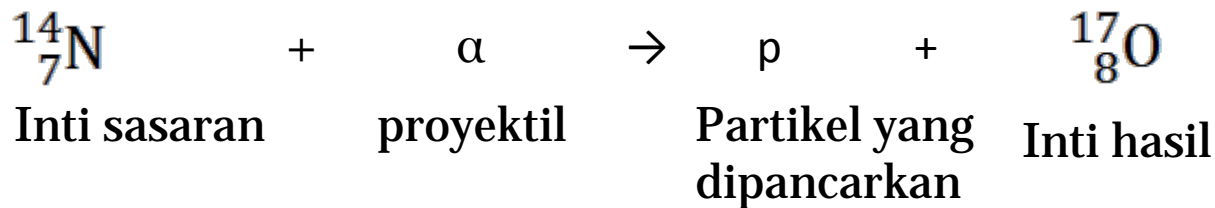


Sulistyani, M.Si.
Email: sulistyani@uny.ac.id

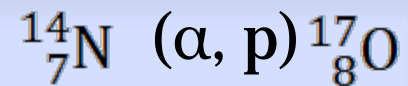
- **Sebutkan perbedaan antara reaksi inti dengan reaksi kimia umumnya?**

KONSEP

- Reaksi nuklir merupakan proses pengubahan inti atom melalui reaksi pertukaran dengan partikel-partikel dasar penyusun inti atom.
- Reaksi nuklir buatan pertama kali dilakukan oleh Rutherford (tahun 1919), yaitu dengan menembaki inti nitrogen dengan partikel alfa yang berasal dari peluruhan ^{214}Po .



Dapat ditulis:



- Reaksi penembakan inti dikenal dengan istilah transmutasi inti.
- Sebagian besar reaksi nuklir berlangsung melalui tahap antara, yaitu membentuk inti transisi atau inti majemuk, baru kemudian berubah menjadi inti hasil.

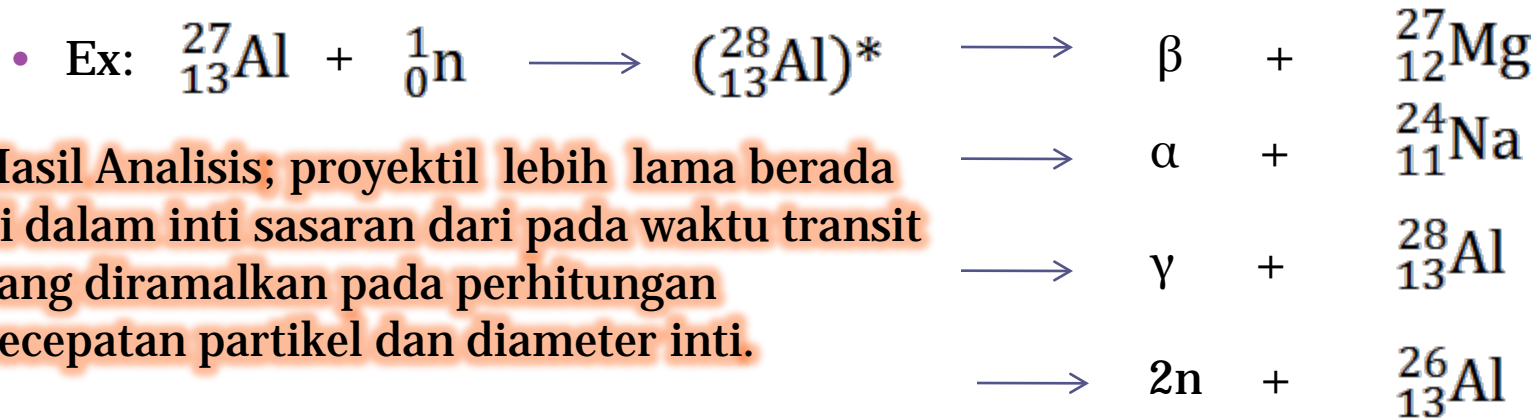
Perbedaan Reaksi Nuklir dibandingkan dengan Reaksi Kimia

- Pada reaksi kimia, jumlah pereaksi dan hasil reaksi dinyatakan dalam mol, sedangkan pada reaksi nuklir berhubungan dengan massa masing-masing atom.
- Perubahan energi pada reaksi kimia dinyatakan dalam J/mol, sedangkan pada reaksi nuklir dinyatakan dalam eV atau MeV. (96 kJ/mol = 1 eV)
- Pada reaksi kimia, unsur-unsur yang terlibat reaksi tetap utuh hanya ikatan atomnya yang berubah, sedangkan pada reaksi nuklir terbentuk nuklida baru.
- Energi yang dihasilkan pada reaksi nuklir jauh lebih besar daripada reaksi kimia.
Ex: pembelahan 1 g ^{235}U membebaskan energi sebesar $8,4 \cdot 10^7$ kJ, sedangkan pembakaran batu bara membebaskan energi sebesar 33,9 kJ.

Mekanisme Reaksi Nuklir

Reaksi nuklir yang melalui pembentukan inti majemuk

- Terjadi bila energi proyektil kurang dari 50 MeV.



Reaksi nuklir langsung (tanpa pembentukan inti majemuk)

- Terjadi bila energi proyektil lebih dari 50 MeV.



Energi yang dilepaskan atau diperlukan pada reaksi nuklir

Ex: Untuk reaksi nuklir $A(x,y)B$

$$\Delta E = (m_A + m_x - m_B - m_y) \times c^2$$

$$\Delta E = (m_A + m_x - m_B - m_y) \times 931,5 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = (\Delta_A + \Delta_x - \Delta_B - \Delta_y) \times \text{MeV}$$

ΔE juga dinyatakan sebagai nilai Q reaksi

- Jika ΔE negatif maka reaksi nuklir tersebut memerlukan energi. Energi yang diperlukan dapat diberikan pada reaksi tersebut sebagai energi kinetik proyektil.
- Perlu diingat, tidak semua energi kinetik proyektil diubah menjadi energi eksitasi inti majemuk yang terbentuk, tetapi dapat juga sebagai energi pental inti majemuk, sedangkan energi yang dibebaskan pada reaksi nuklir muncul sebagai energi kinetik dari hasil-hasil reaksi.

- **Proyektil yang digunakan pada reaksi nuklir dibedakan menjadi partikel tidak bermuatan (neutron) dan partikel yang bermuatan (proton, deuteron, partikel alfa, xenon, dan uranium).**
- **Partikel yang bermuatan dihasilkan oleh radionuklida, yang kemudian diubah menjadi partikel bermuatan berenergi tinggi dengan menggunakan alat pemercepat ion sistem melingkar (siklotron).**
- **Radionuklida yang dihasilkan dari reaksi nuklir dengan proyektil bermuatan umumnya radionuklida kekurangan neutron, sehingga akan meluruh dengan memancarkan sinar positron atau tangkapan elektron.**
- **Proyektil berupa partikel tidak bermuatan dapat diperoleh dari reaktor nuklir atau ,pembangkit neutron.**

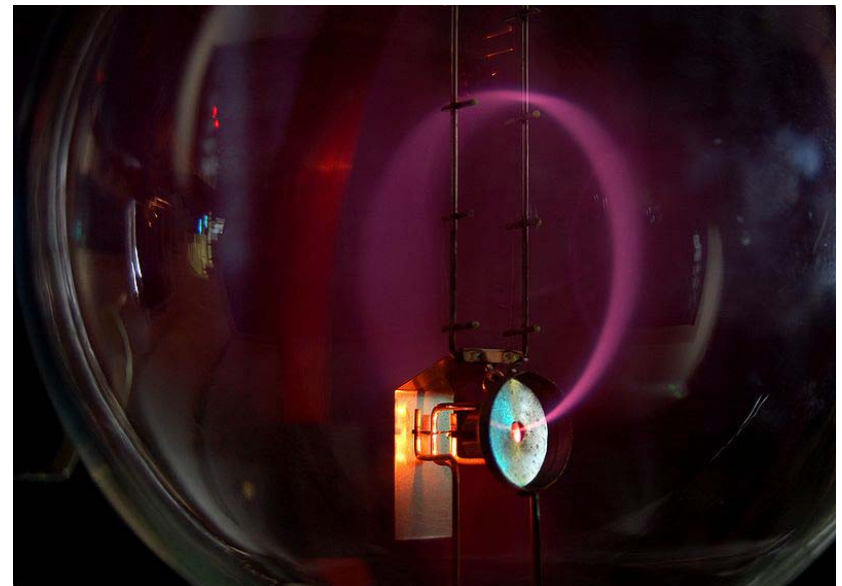
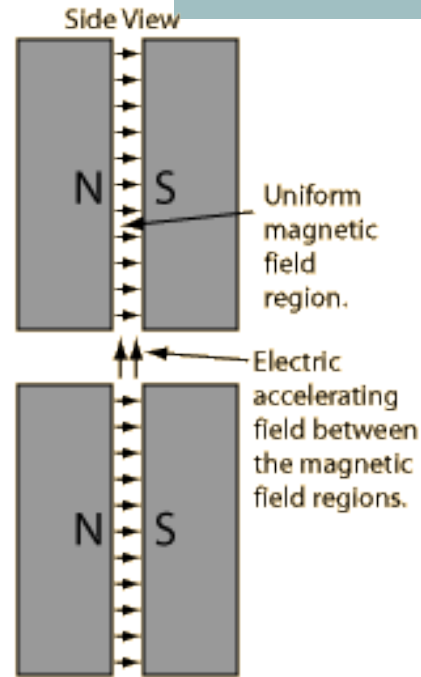
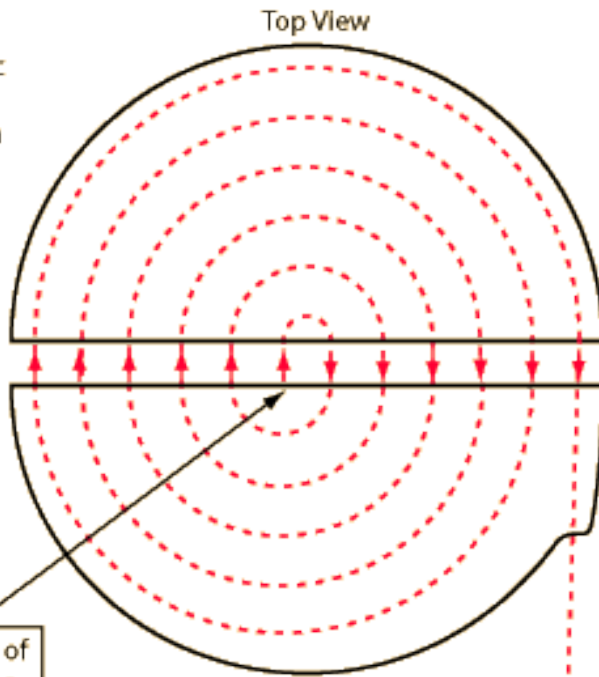
The accelerating electric field reverses just at the time the electrons finish their half circle, so that it accelerates them across the gap. With a higher speed, they move in a larger

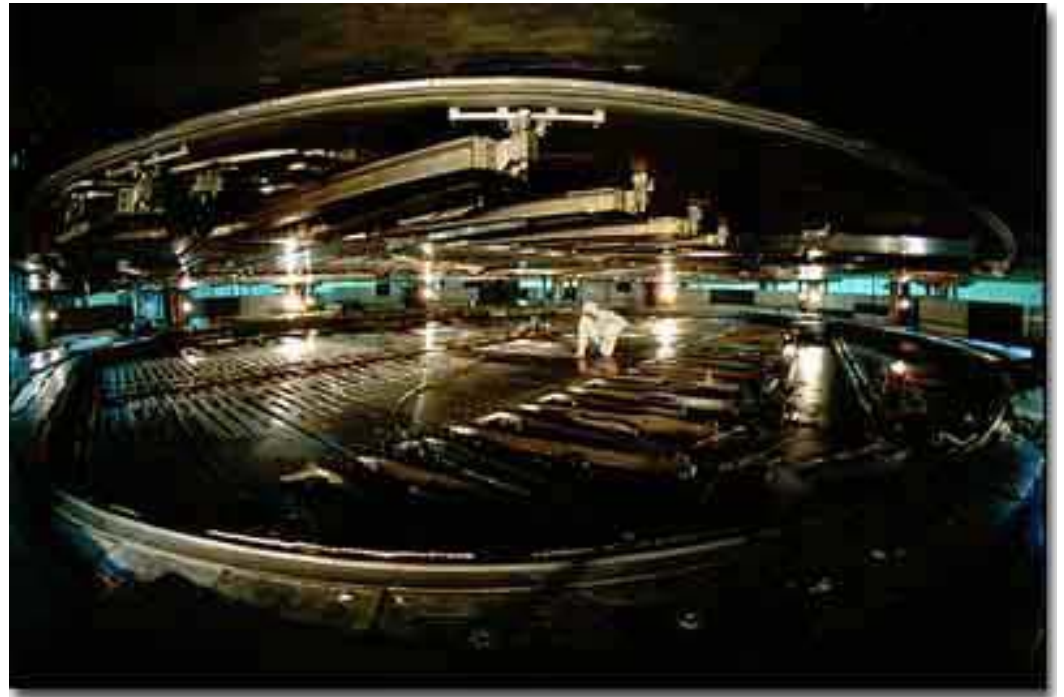


semicircle. After repeating this process several times, they come out the exit port at a high speed.

Injection of electrons

Output beam of high velocity electrons.





Jenis-jenis proyektil neutron berdasarkan energinya

- Neutron termal, berenergi $\sim 0,025$ eV . Neutron ini memiliki distribusi energi hampir sama dengan distribusi energi molekul-molekul gas dalam keseimbangan termal pada temperatur biasa.
- Neutron epitermal, berenergi ~ 1 eV
- Neutron lambat, berenergi ~ 1 keV
- Neutron cepat, berenergi $\sim 0,1 - 10$ MeV

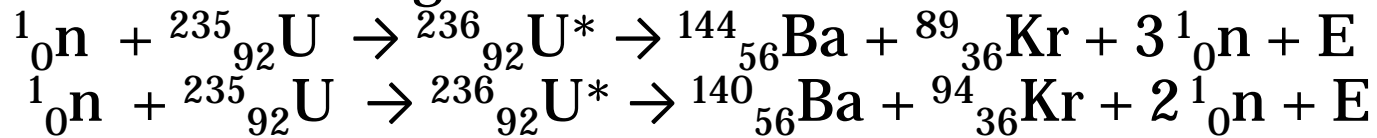
Pada generator neutron, berkas deuterium dipercepat oleh pemercepat linier (akselerator) dan dikenakan pada sasaran tritium (${}_1^3\text{H}$). Reaksi: ${}_1^3\text{H}(d,n){}_2^4\text{He}$.

Proyektil neutron yang dihasilkan oleh generator neutron merupakan neutron cepat (n^*) dengan energi ~ 14 MeV. Radionuklida hasil penembakan dengan proyektil cepat berupa radionuklida yang kekurangan neutron sehingga mode peluruhannya adalah TE atau pemancaran positron.

Reaktor Nuklir

- Reaktor Nuklir pertama kali dibuat oleh Fermi tahun 1942.
- Reaktor nuklir dikelompokkan menjadi reaktor penelitian dan reaktor daya.
- Reaktor penelitian dirancang sebagai penghasil neutron yang dapat digunakan untuk pembuatan radionuklida, untuk analisis, dsb.
- Reaktor daya dirancang untuk menghasilkan daya, misalnya pembangkit tenaga listrik, penggerak kapal selam.

- Pada reaktor nuklir berlangsung reaksi pembelahan inti (reaksi fisi) berantai secara terus menerus dan terkendali.
- Ada dua reaksi fisi, yaitu reaksi fisi dengan neutron cepat (n^*) dan reaksi fisi dengan neutron termal. Ex:

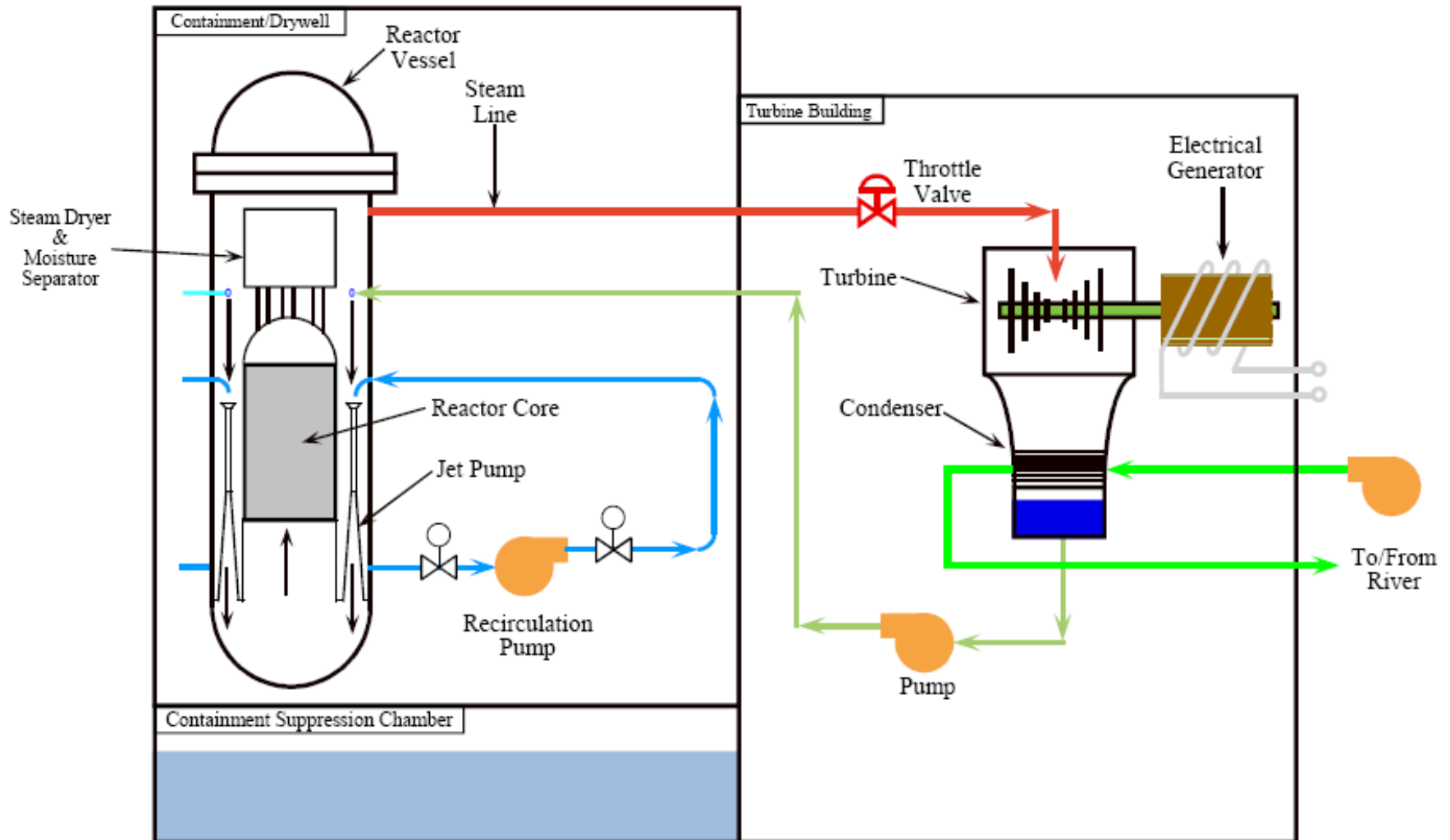


- Energi yang dihasilkan pada reaksi fisi tersebut ~ 200 MeV dan energi neutron yang dihasilkan ~ 2 MeV.
- Agar neutron dapat melangsungkan reaksi fisi selanjutnya, neutron harus diperlambat menjadi neutron termal. Alat yang digunakan untuk memperlambat neutron disebut moderator (air, air berat (D₂O), berilium, atau grafit).
- Reaksi fisi selanjutnya dikendalikan dengan menggunakan batang kendali, berfungsi menyerap neutron hingga jumlah neutron di dalam teras reaktor sesuai keperluan. Dengan kata lain batang kendali mengatur jumlah reaksi fisi dan jumlah energi yang dihasilkan. Bahan batang kendali: kadmium, boron, atau hafnium.

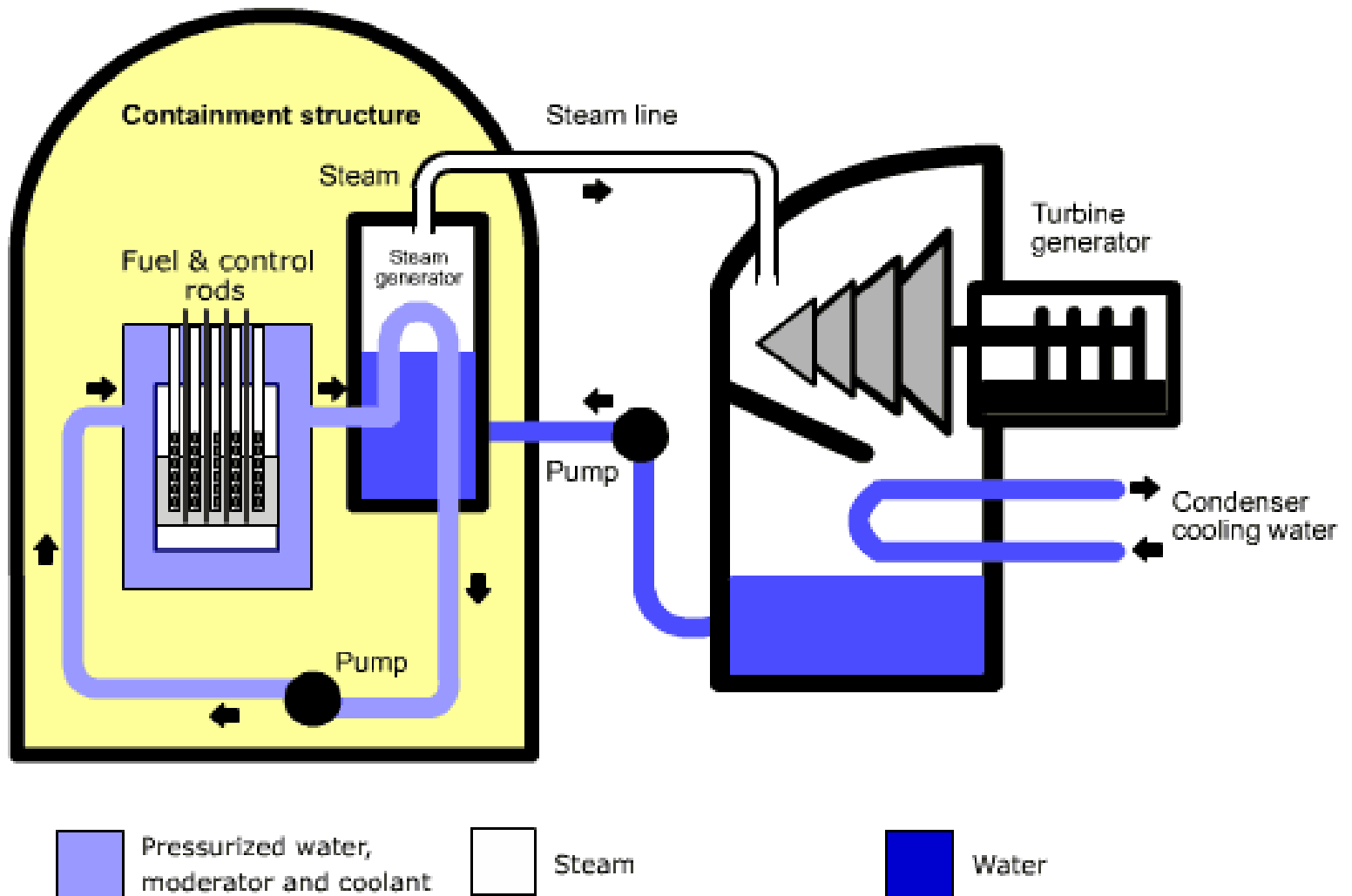
Komponen-komponen reaktor nuklir

- Tangki reaktor,
- Perisai radiasi
- Teras reaktor, merupakan susunan elemen bahan bakar, batang kendali ditempatkan pada lubang-lubang plat kisi menurut konfigurasi tertentu, dan reflektor.
- Fasilitas irradiasi dan eksperimen
 - Penyalur berkas neutron, berfungsi untuk irradiasi sampel dengan ukuran agak besar.
 - Kolom termal, berfungsi untuk irradiasi dengan neutron termal.
 - Saluran tengah, berfungsi untuk keperluan irradiasi atau eksperimen dengan fluks neutron maksimum.
 - Fasilitas bulk shielding, berupa bak air yang dihubungkan dengan kolom termalisasi. Komponen ini digunakan untuk eksperimen perisai dan untuk menyimpan sementara bahan bakar bekas.
 - Perangkat subkritik, sebagai sumber neutron tetap
 - Sistem pemindah pneumatik, berfungsi memasukkan dan mengeluarkan sampel dari dalam teras secara cepat.

Boiling Water Reactor

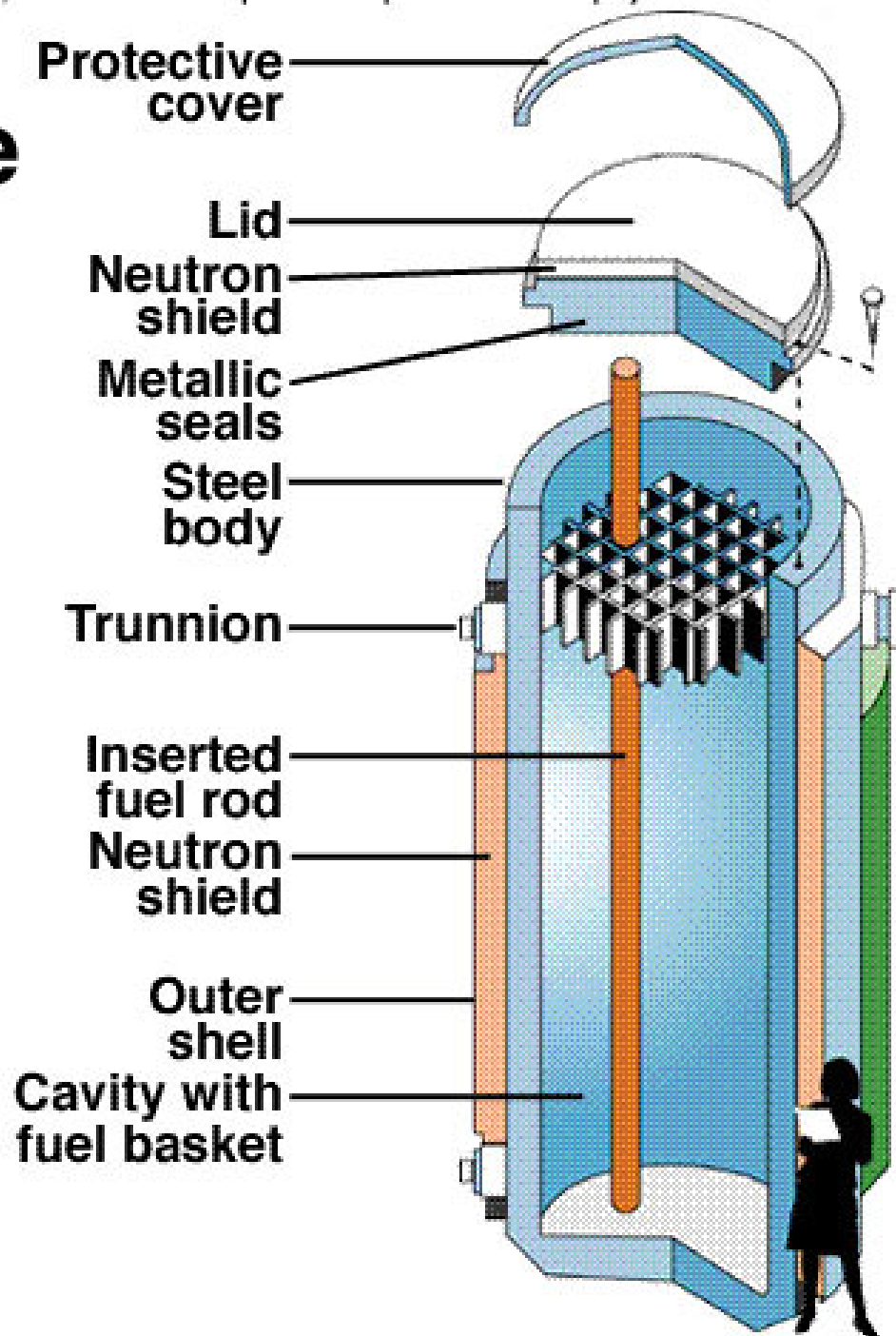


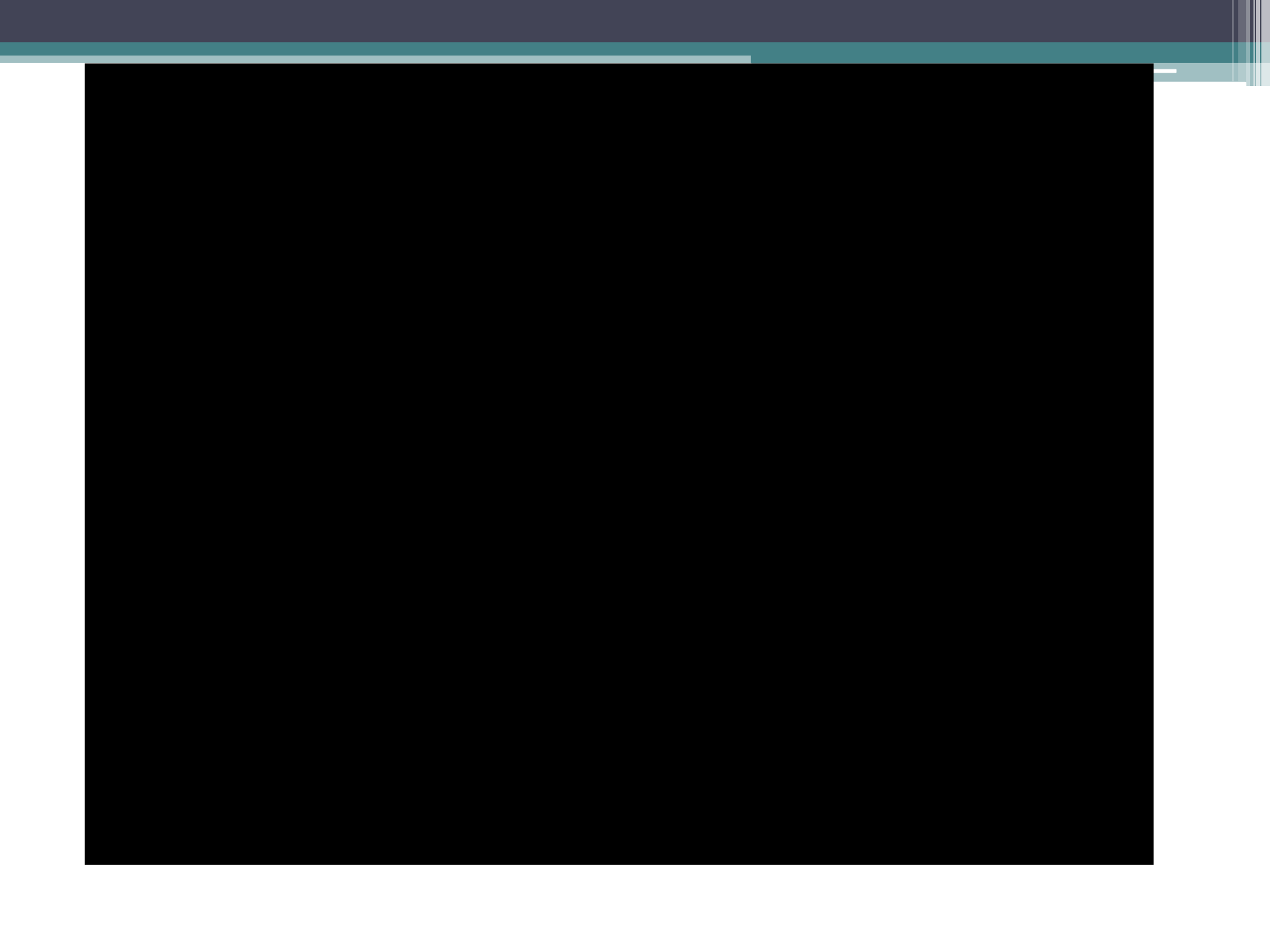
Pressurized Water Reactor



Source:

Dry Cask Storage

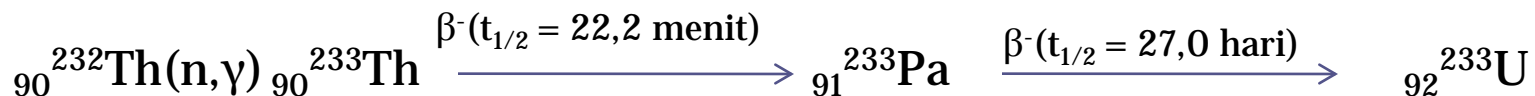




Bahan Bakar Nuklir

- Bahan bakar nuklir adalah bahan yang dapat mengalami reaksi fisi.
- Bahan bakar yang paling banyak digunakan adalah uranium.
- Uranium di alam tidak dalam keadaan bebas, tetapi dalam bentuk mineralnya, di antaranya pitchblende, uranit, dan carnotite.
- Uranium di alam terdapat 2 isotop, yaitu ${}_{92}^{235}\text{U}$ (0,7% berat) dan ${}_{92}^{238}\text{U}$ (99,3% berat).
- ${}_{92}^{235}\text{U}$ merupakan bahan fisil, yaitu bahan dapat belah artinya dapat langsung bereaksi dengan neutron termal melakukan reaksi fisi nuklir.
- ${}_{92}^{238}\text{U}$ merupakan bahan fertil, yaitu bahan tidak dapat belah artinya tidak dapat melangsungkan reaksi fisi dengan neutron termal. Nuklida fertil lainnya adalah ${}_{90}^{232}\text{Th}$.
- ${}_{92}^{238}\text{U}$ dan ${}_{90}^{232}\text{Th}$ dapat diubah menjadi bahan fisil lain, yaitu ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ dan ${}_{92}^{233}\text{U}$.

Reaksinya:



Pengolahan uranium alam

- Proses konsentrasi, konsentrat uranium disebut yellow cake.
- Proses pemurnian, hingga mencapai kemurnian 99,9%.
- Proses pabrikasi, membentuk serbuk menjadi elemen bahan bakar berbentuk pellet yang dimasukkan kelongsong bahan bakar.



Mining

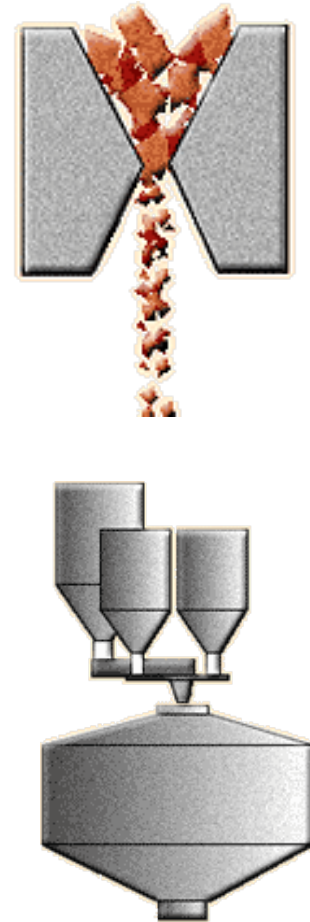


Uranium ore is usually located aurally; samples are then and analyzed by geologists. The

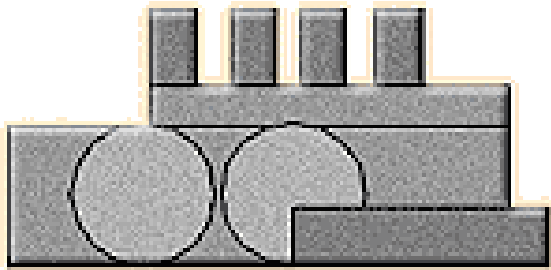
uranium ore is extracted by means of drilling and blasting. Mines can be in either open pits or underground. Uranium concentrations are a small percentage of the rock that is mined, so tons of tailings waste are generated by the mining process.

Milling & Leaching

- The ore is first crushed into smaller bits, then it is sent through a ball mill where it is crushed into a fine powder. The fine ore is mixed with water, thickened, and then put into leaching tanks where 90% of the uranium ore is leached out with sulfuric acid. Next the uranium ore is separated from the depleted ore in a multistage washing system. The depleted ore is then neutralized with lime and put into a tailings repository.



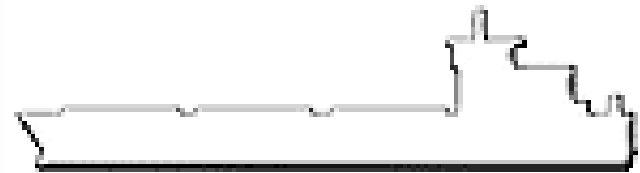
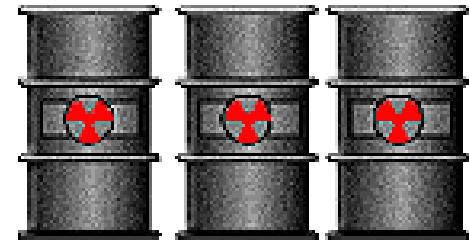
Yellowcake

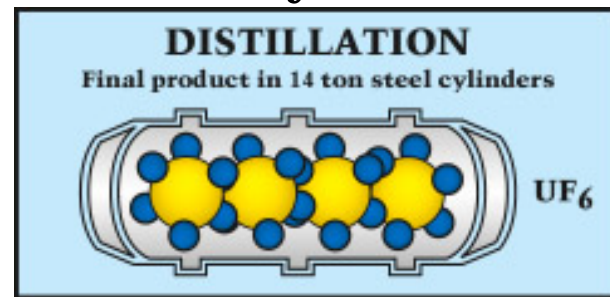
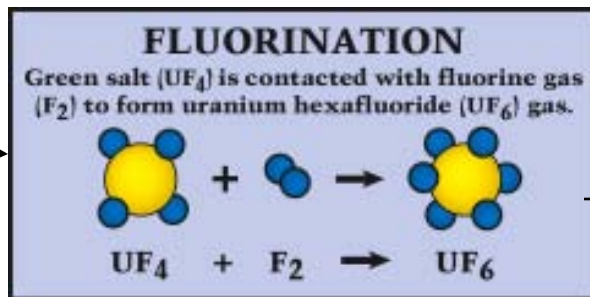
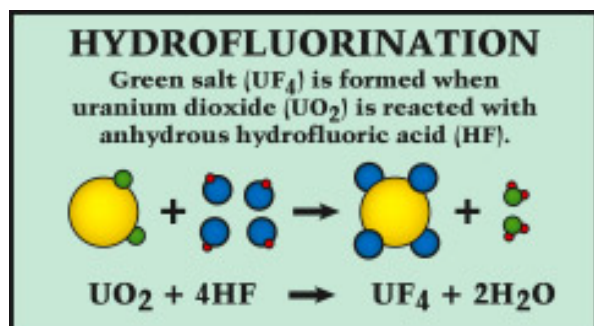
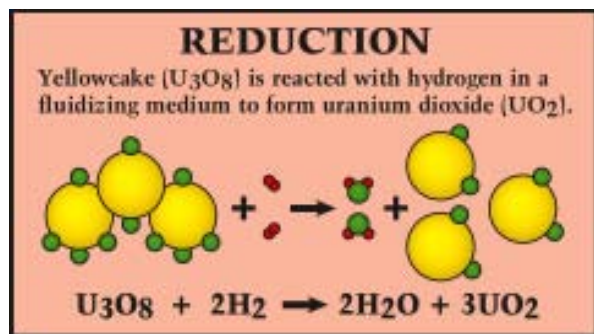


- Meanwhile, the uranium solution is filtered, and then goes through a solvent extraction process that includes kerosene and ammonia to purify the uranium solution. After purification the uranium is put into precipitation tanks—the result is a product commonly called yellowcake.

Transportation

- In the final processes the yellow cake is heated to 800° Celcius which makes a dark green powder which is 98% U_3O_8 . The dark green powder is put into 200 liter drums and loaded into shipping containers and are shipped overseas to fuel nuclear power plants.





To enrich uranium it must be in the gas form of UF_6 . This is called conversion. The conversion diagram shown here is from Honeywell. First the yellow cake is converted to uranium dioxide through a heating process (this step was also mentioned in the mining process). Then anhydrous hydrofluoric acid is used to make UF_4 . Next the UF_4 is mixed with fluorine gas to make uranium hexafluoride. This liquid is stored in steel drums and crystallizes.

Enrichment

- Uranium enrichment increases the amount of U235 in comparison to U238. Domestic power plants use a mixture that is 3-5% U235, while “highly enriched uranium” is generally used for weapons, some research facilities, and naval reactors. Domestic reactors usually require fuel in the form of uranium dioxide and weapons use the enriched mix in the form of a metal. The conversion and enrichment process is very dangerous because not only is the uranium hexafluoride radioactive, it is also chemically toxic. In addition, if the uranium hexafluoride comes in contact with moisture it will release another very toxic chemical called hydrofluoric acid. There have been numerous accidents during the conversion and enrichment process. Depleted uranium is the waste that is generated from the enrichment process.

Fuel Fabrication

- After being enriched, the UF₆ is taken to a fuel fabrication facility that presses the powder into small pellets. The pellets are put into long tubes. These tubes are called fuel rods. A fuel assembly is a cluster of these sealed rods. Fuel assemblies go in the core of the nuclear reactor. It takes approximately 25 tonnes of fuel to power one 1000 MWe reactor per year. The picture on the right is a fuel assembly.

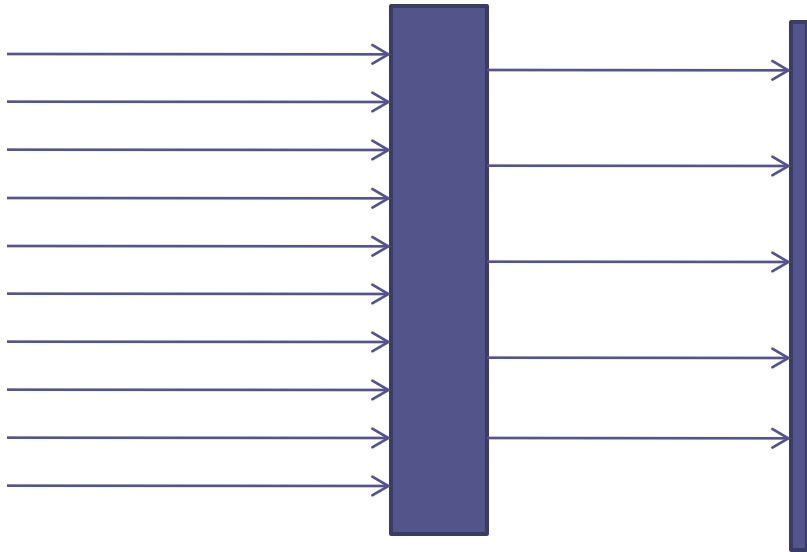


Source: <http://www.world-nuclear.org/education/nfc.htm>

Tampang Lintang (Cross Section) Reaksi Nuklir

- Kemungkinan terjadinya reaksi nuklir disebut penampang lintang (σ) yang mempunyai dimensi luas.
- Tampang lintang dapat dibandingkan dengan tetapan laju reaksi.
- Ex: Reaksi kimia $A + B \rightarrow D$, maka laju reaksinya dinyatakan $dC_D/dt = kC_A C_B$
- Dengan cara sama, untuk reaksi nuklir $A(x,y)B$ dinyatakan: $dN_B/dt = \sigma Q_x N_A$
- N_A dan N_B adalah jumlah atom A dan B per satuan volum, Q_x adalah fluks yaitu jumlah proyektil per satuan luas per waktu ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), dan σ adalah tampang lintang.
- Bila berkas partikel jenis x dengan fluks Q menabrak lapisan tipis atom A dengan ketebalan s , maka pada saat partikel memasuki lapisan dengan ketebalan ds , fluks partikel akan berkurang sebesar:
- $-dQ_x = \sigma Q_x N_A ds$ jika diintegrasikan akan diperoleh:
- $\ln Q_x/Q_{x(0)} = \sigma Q_x N_A s$ untuk reaksi nuklir: $A(x,y)B$

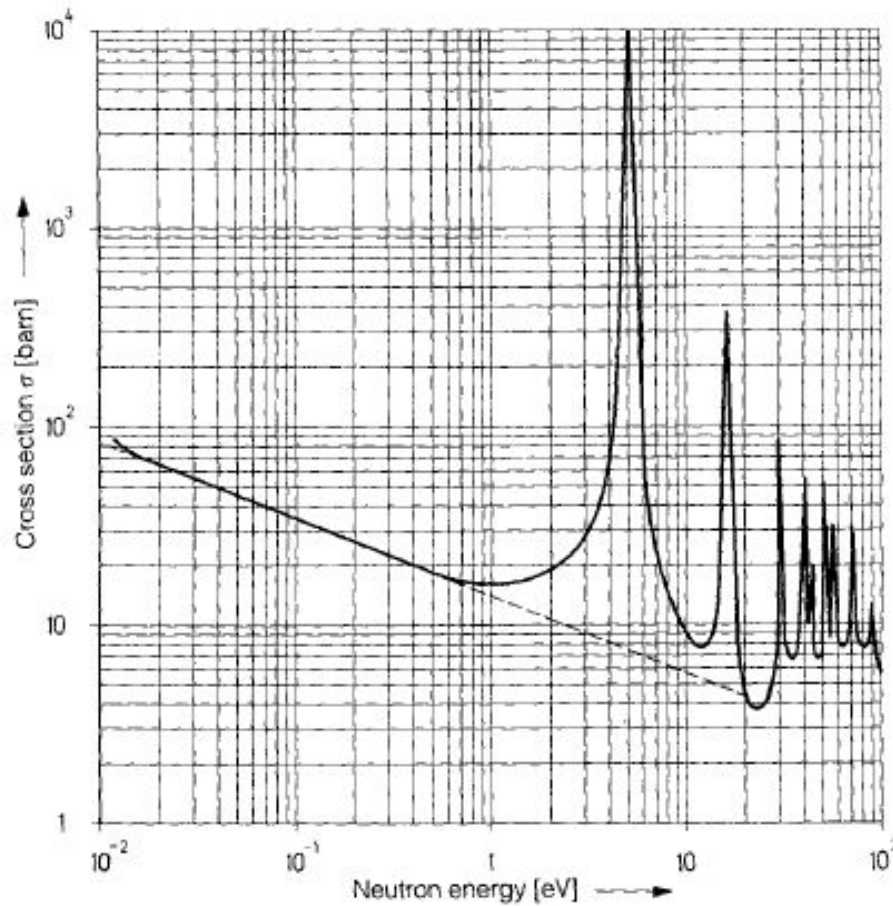
Penampang Lintang



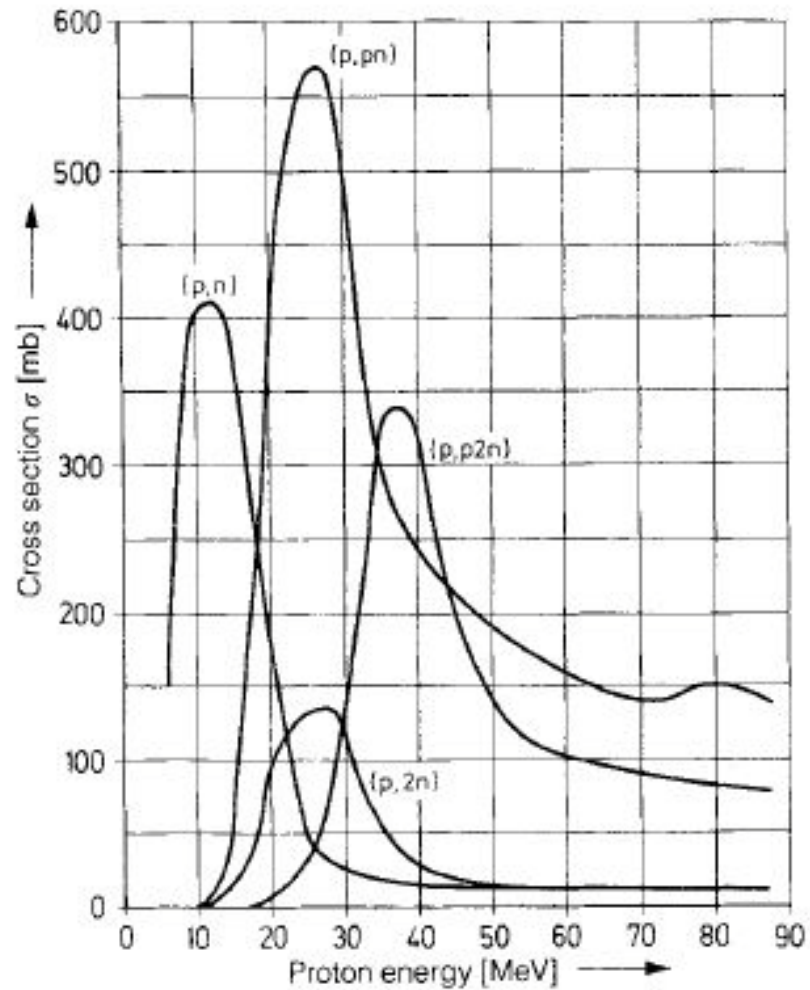
Bila ada reaksi nuklir lainnya maka cross section reaksi adalah cross section total.

Satuan cross section reaksi nuklir adalah barn, $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Cross section sebagian besar reaksi bergantung pada energi proyektil sehingga kebolehjadian terjadinya reaksi nuklir merupakan fungsi energi proyektil, yang berupa energi kinetik proyektil yang dipindahkan ke inti majemuk sebagai energi eksitasi inti majemuk. Ketergantungan kebolehjadian reaksi nuklir pada energi proyektil disebut fungsi eksitasi.



Cross section σ of Ag for neutrons as a function of the energy of the neutrons



Cross sections of several nuclear reactions of protons with ^{63}Cu as a function of their energy.

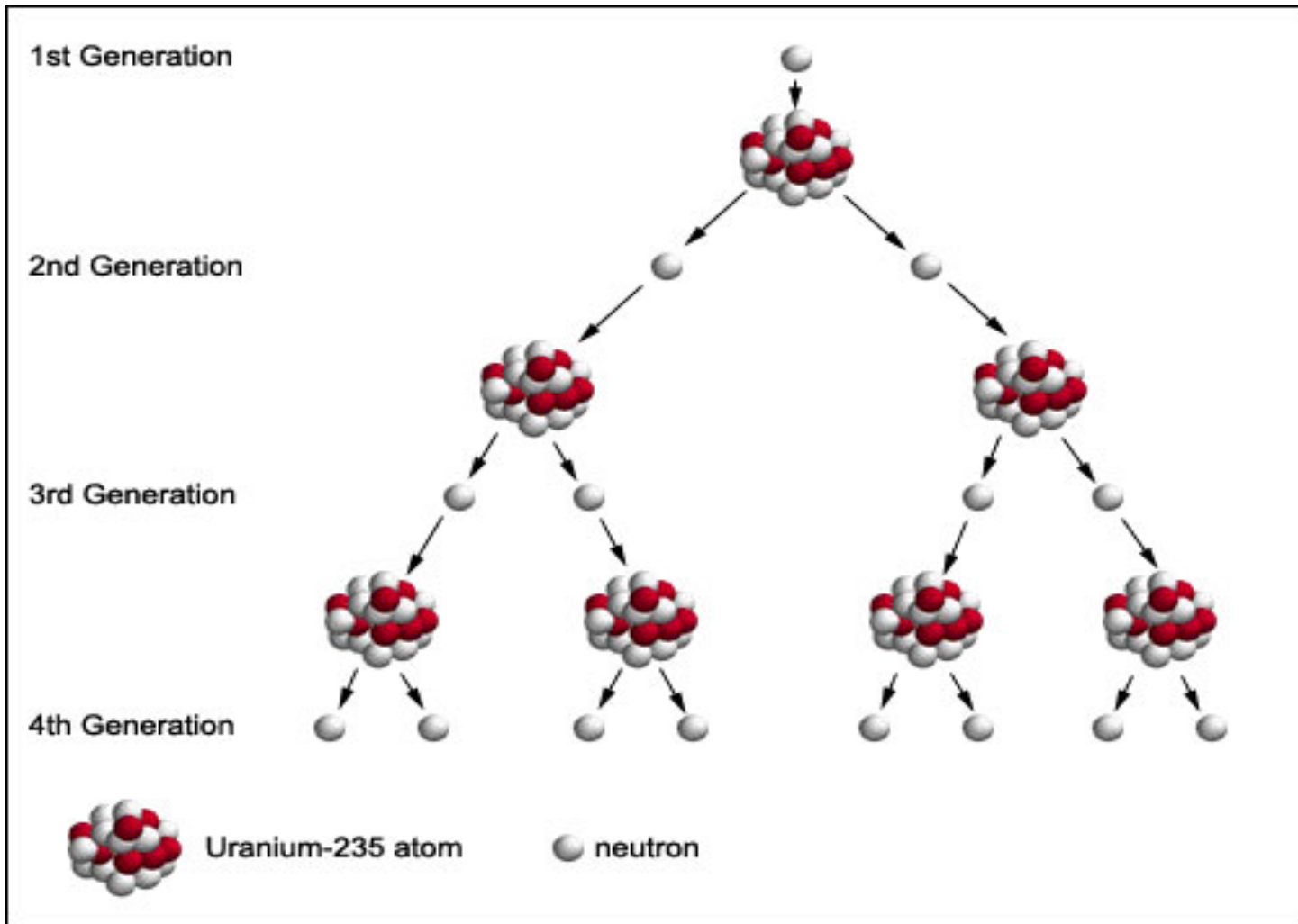
Reaksi Nuklir dengan Partikel Bermuatan

- Proyektil partikel bermuatan (proton, neutron, partikel alfa) mampu menabrak inti jika energinya dapat mengatasi potensial penghalang inti sasaran.
- Tingginya potensial penghalang (E_c) tergantung pada nomor atom inti sasaran dan nomor atom proyektil.
$$E_c = (1/4\pi\epsilon_0) (Z_1eZ_2e/r) \quad \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{C}^2\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$$
- Bila E_c dalam MeV dan r dalam cm, maka
$$E_c = 1,44 \cdot 10^{-13} (Z_1Z_2/r) \text{ MeV}$$
 dengan r adalah jarak dimana gaya inti mulai bekerja yaitu: $r = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ dimana $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$
- Cross section maksimum untuk reaksi absorpsi partikel-partikel bermuatan umumnya mendekati πr^2 (r = jarak antara pusat inti partikel proyektil dan inti sasaran bila keduanya bertemu) sehingga dinyatakan sebagai jari-jari pertukaran reaksi inti.
- Jenis reaksi khusus lainnya adalah reaksi Oppenheimer, biasanya menggunakan neutron sebagai proyektil.

Reaksi Nuklir dengan Neutron

- Neutron tidak bermuatan sehingga neutron mudah mendekati inti tanpa ditolak oleh muatan inti atom sasaran.
- Neutron mudah ditangkap oleh inti sasaran dengan makin berkurangnya kecepatan neutron.
- $\Sigma_c \sim 1/v \sim 1/E^{1/2}$
- Sebagian besar reaksi nuklir yang melibatkan neutron termal adalah proses tangkapan neutron, dimana energi eksitasi inti majemuk dihilangkan dengan pemancaran sinar gamma (n, γ).
- Reaksi neutron yang memancarkan partikel bermuatan setelah menangkap neutron seperti (n,p) atau (n, α) merupakan reaksi yang terjadi dengan melalui energi ambang (threshold reaction).
- Pembelahan inti dengan neutron termal hanya mungkin terjadi pada inti dengan tipe (g,u) dan (u,u), sedangkan pembelahan inti berat lainnya dikarenakan suatu reaksi ambang.

Reaksi Fisi Berantai



Perhitungan Hasil pada Reaksi Nuklir

- Untuk reaksi $A(x,y)B$, laju pembentukan nuklida B adalah: $dN_B/dt = \sigma Q_x N_A$
- Dengan asumsi fluks dan energi proyektil konstan selama melalui volum sasaran (sasaran diasumsikan relatif tipis), jumlah inti yang transmudasi dalam reaksi nuklir diabaikan, cross section kecil.
- Bila nuklida hasil bersifat radioaktif, maka peluruhan selama waktu iradiasi harus diperhitungkan. $dN_B/dt = \sigma Q_x N_A - \lambda N_B$
- Pada integrasi antara $t=0$ dan $t=t$, pada $t=0$ maka $N_B=0$ sehingga $N_B = (\sigma Q_x N_A / \lambda) (1 - e^{-\lambda t})$
- Oleh karena $A = -dN_B/dt = \lambda N_B$ maka $A_{B(t)} = (\sigma Q_x N_A) (1 - e^{-\lambda t})$
- Jika $N_A = (L \times I_A \times m_A) / Ar_A$ maka $A_{B(t)} = (\sigma Q_x L \times I_A \times m_A) / Ar_A (1 - e^{-\lambda t})$
- Radioaktivitas nuklida yang diiradiasi selama waktu t kemudian dibiarkan meluruh selama waktu t' , maka persamaan setelah akhir irradiasi adalah: $A_{B(t')} = A_{B(t)} \times e^{-\lambda t'}$

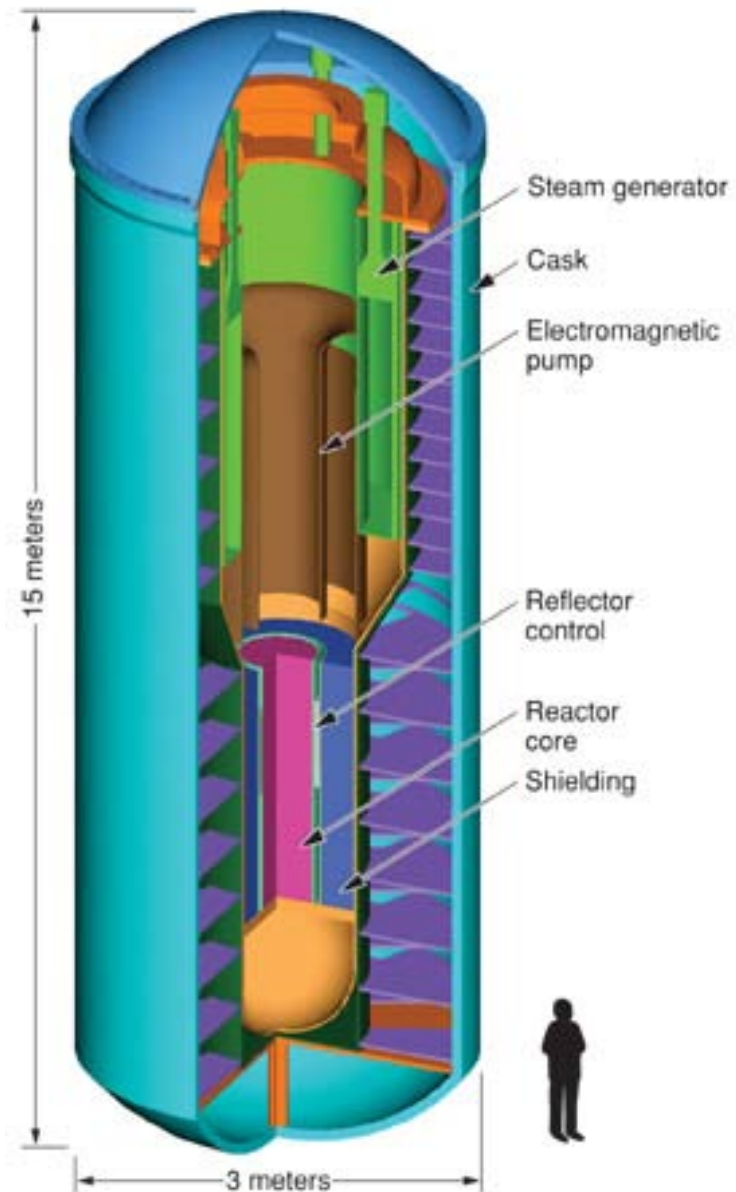
- **ADVANTAGES**

- Nuclear power generation does emit relatively low amounts of carbon dioxide (CO₂). The emissions of green house gases and therefore the contribution of nuclear power plants to global warming is therefore relatively little.
- This technology is readily available, it does not have to be developed first.
- It is possible to generate a high amount of electrical energy in one single plant

- **DISADVANTAGES**

- Nuclear power plants as well as nuclear waste could be preferred targets for terrorist attacks..
- During the operation of nuclear power plants, radioactive waste is produced, which in turn can be used for the production of nuclear weapons.
- Nuclear reactors have a high risk, especially if there is leakage.

Reaktor Nuklir Portable



- **Charge particle accelerator = pemercepat partikel bermuatan**