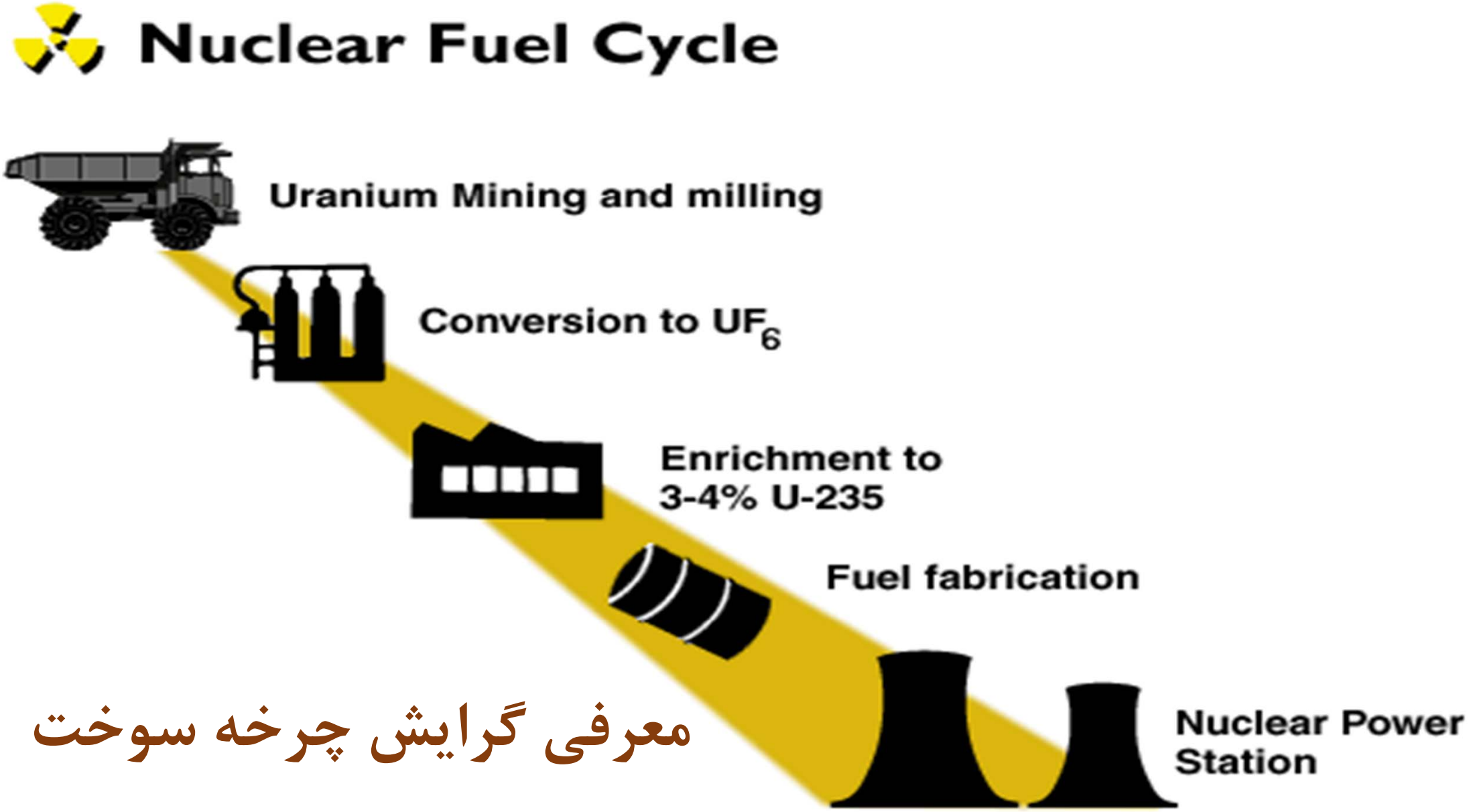
بسم الله الرحمن الرحیم



معرفی گرایش چرخه سوخت

چرخه سوخت ≡ مهندسی شیمی هسته ای و فرآیند مواد مورد نیاز راکتور

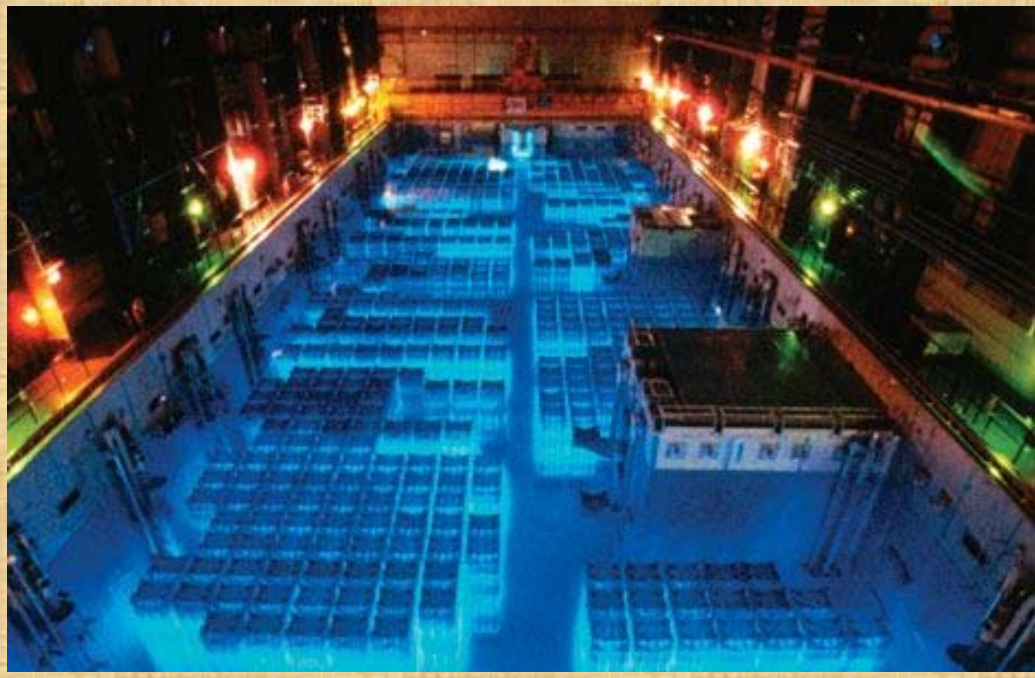
۱- بدون تامین مواد مورد نیاز، نه راکتوری قابل ساخت است و نه تامین انرژی هسته ای ممکن است.

۲- ایران در زمینه چرخه سوخت هم سرمایه گذاری بیشتری کرده و هم به سطح بالاتری از فناوری در قیاس با فناوری راکتور دست یافته است.

چرخه سوخت: زمینه ای بین رشته های مهندسی شیمی،مواد، مکانیک، فیزیک و غیره

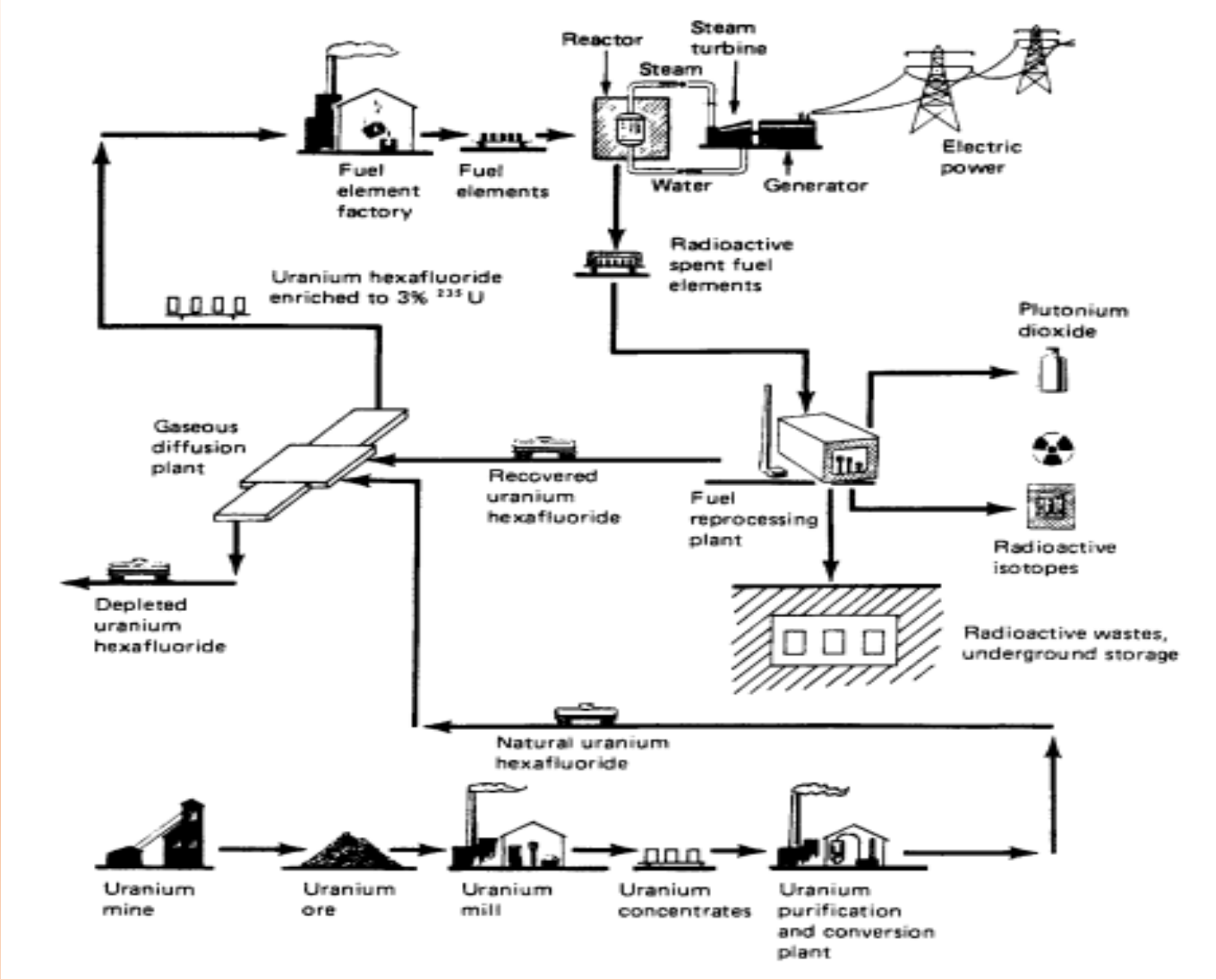
کانی اورانیم

میله های سوخت راکتور



استخرسوخت های فرسوده

مراحل چرخه سوخت هسته ای



مراحل چرخه سوخت : ۱- استخراج اورانیم از سنگ معدن:

درصد متوسط اورانیم در سنگ معدن تنها 0.1% است بنابراین باید کانی اورانیم در اسید یا قلیا حل شده و اورانیم از محلول حاصله استخراج شود

پیچبلند (سنگ معدن اورانیم)

کیک زرد بر روی فیلترهای آخر

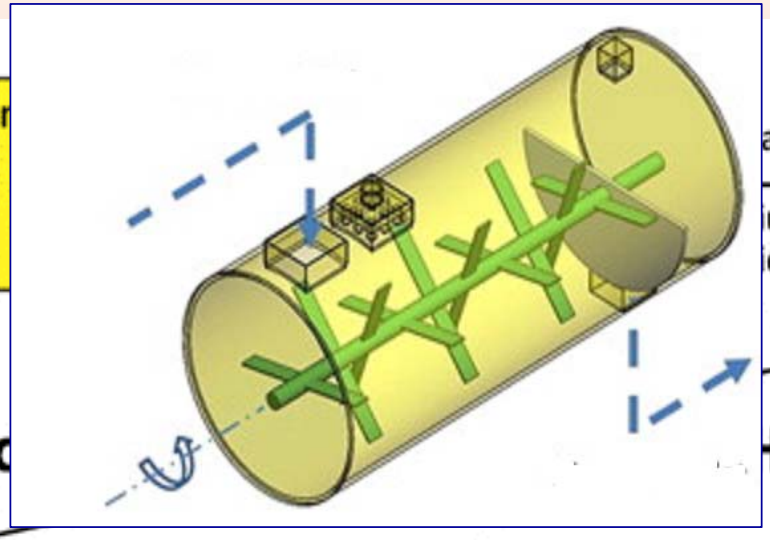
محصول کیک زرد نهایی

مراحل استخراج اورانیم در روش فروشویی (Leaching) اسیدی

اتوکلاو فشار بالا برای فروشویی قلیایی

مراحل چرخه سوخت : ۲- تبدیل کیک زرد به UF_6

راکتور همزن دار برای انحلال کیک زرد در
اسید نیتریک (کارخانه UCF اصفهان)



راکتور بستر بهم خورده
برای واکنش های گاز -جامدتبدیل اورانیم

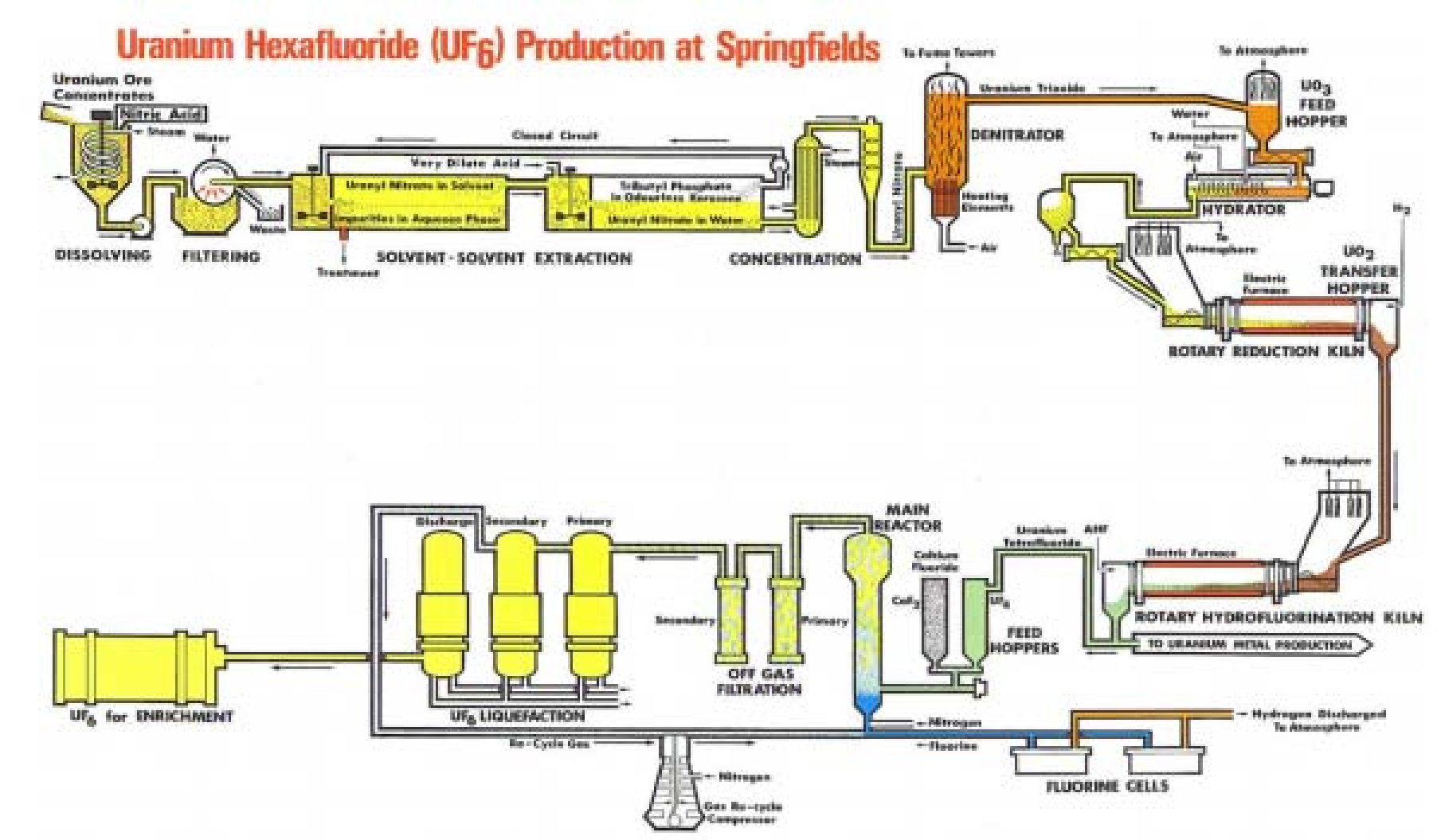
کپسول ۲۰۰۰ کیلویی حمل UF_6

پودر UO_2

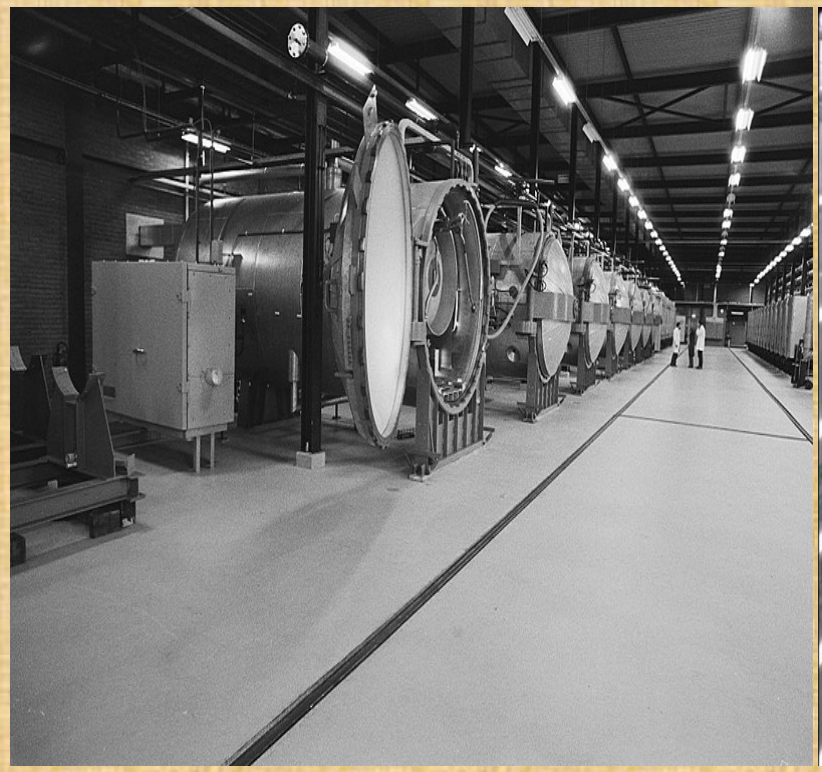
پودر UF_4

UF_6 در دمای معمولی

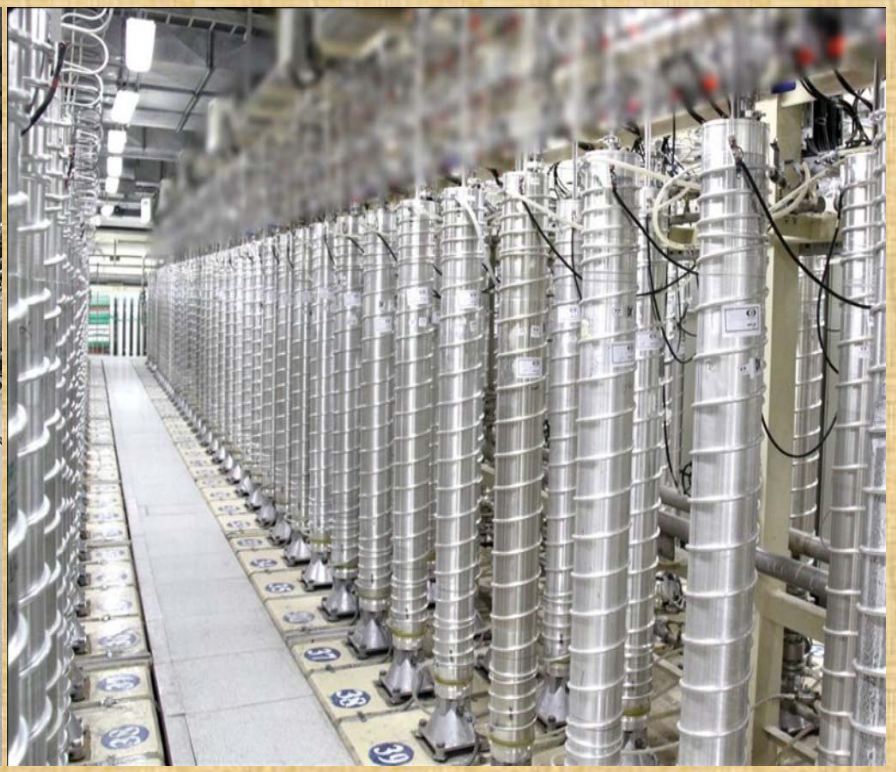
کارخانه نمونه تبدیل کیک زرد به UF_6 در آمریکا



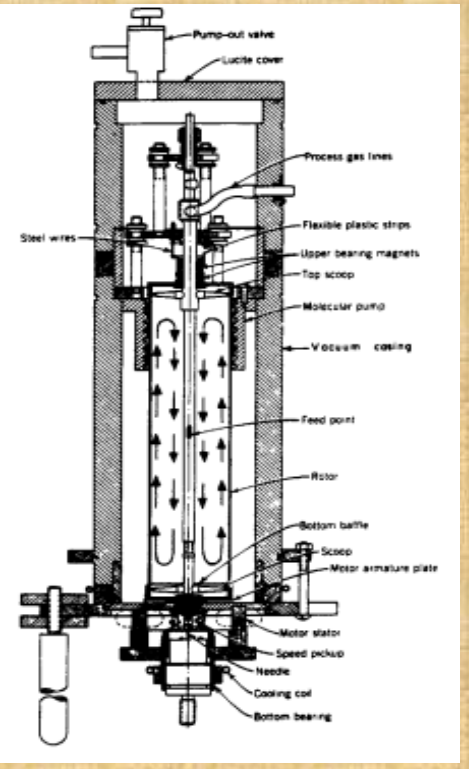
مراحل چرخه سوخت : ۳- غنی سازی اورانیم



سیستم تصعید گاز UF_6
و تزریق آن به آبشار



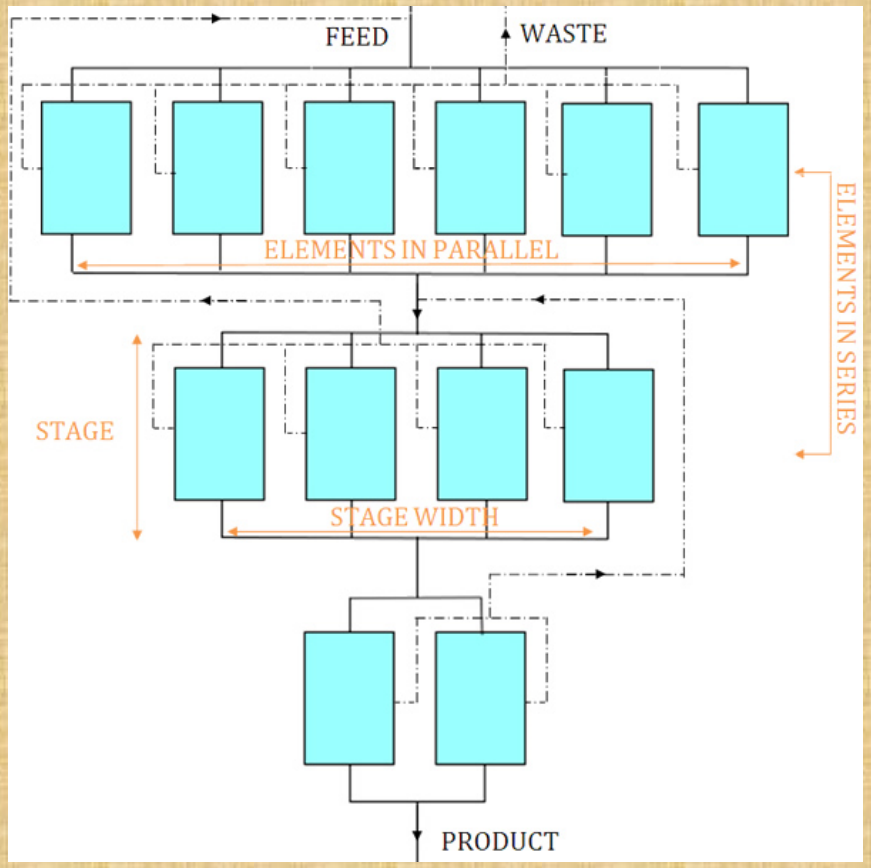
آبشار سانتریفوژهای IR-1
ایران در نطنز



ساختار شماتیک یک
سانتریفوژ گازی

آبشارهای غنی سازی

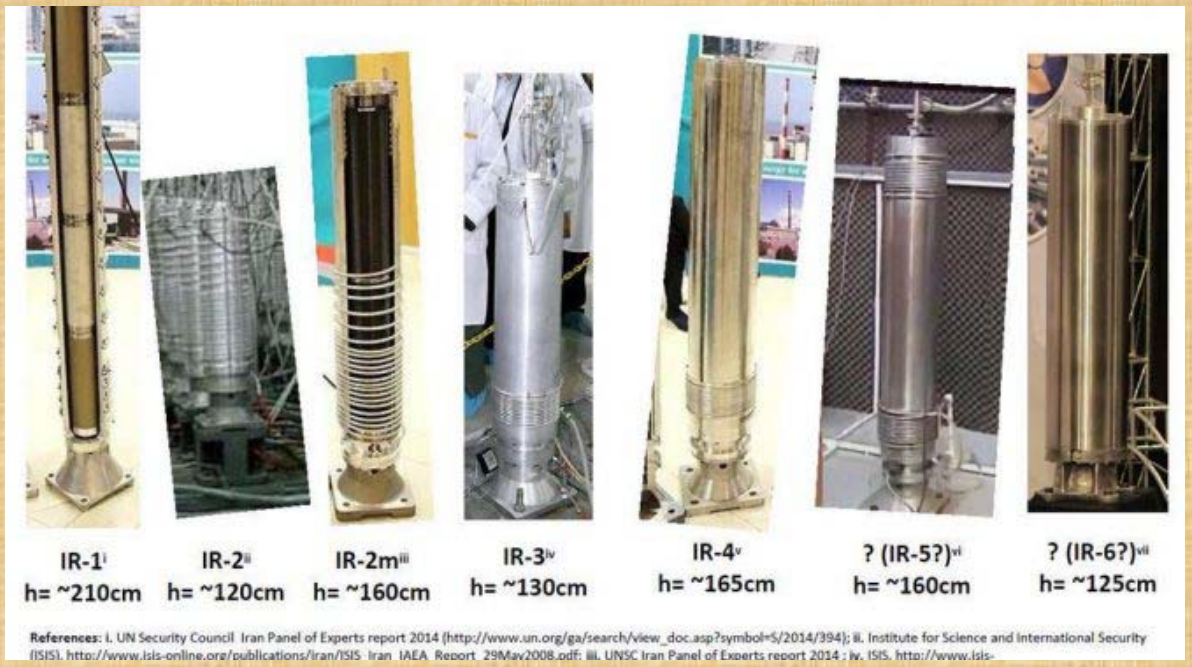
از آنجا که ظرفیت جداسازی هر سانتریفوژکم است، لازم است هزارها سانتریفوژ بنحو خاصی به هم متصل (آبشار سازی) شوند.



یک نمونه از نحوه اتصال (آبشار سازی) سانتریفوژها به هم

آبشار غنی سازی سانتریفوژی شرکت Urenco در هلند

فناوری سانتریفوژ گازی: یکی از پیشرفته ترین فناوری های دنیا



بعضی از سانتریفوژهای ساخت ایران

IR-8 پیشرفته ترین سانتریفوژ ایران(24 kg SWU/year)

ظرفیت جدا سازی مورد نیاز نیروگاه بوشهر= 190000 kg SWU/year

IR-1= 3.5 kg SWU/year ⟶ About 55000 centrifuges are needed

IR-8 =24 kg SWU/year ⟶ About 8000 centrifuges are needed

امکان افزایش ظرفیت سانتریفوژها: با افزایش قطر و ارتفاع روتورها

Overall mass continuity:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho_{eq} r u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{eq} w) = 0, \qquad (7a)$$

Radial momentum:

$$-\bar{\rho} r\Omega^2 - 2\rho_{eq}\Omega v = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru)\right] + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right\} \qquad (7b)$$

Angular momentum:

$$2\rho_{eq}\Omega u = \mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv)\right] + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right\}, \qquad (7c)$$

Axial momentum:

$$0 = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right\}, \qquad (7d)$$

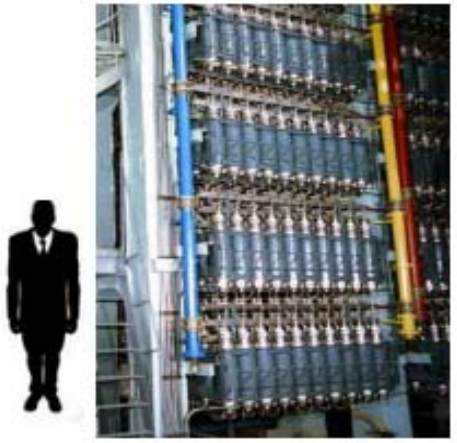
Energy:

$$-\rho_{eq}\Omega^2 r u = \kappa\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \bar{T}}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2}\right]. \qquad (7e)$$

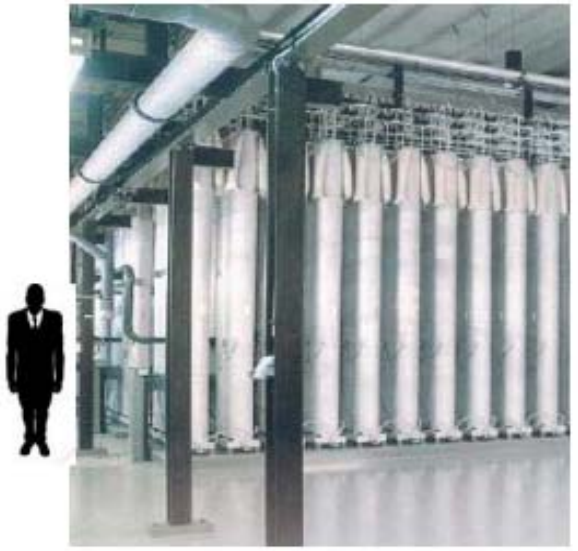
Equation of state:

$$\bar{\rho} = \left(\frac{M}{R\bar{T}_0}\right)\bar{p} - \rho_{eq}\left(\frac{\bar{T}}{\bar{T}_0}\right). \qquad (7f)$$

معادلات حاکم
(روش تحلیل Olander)



Russian (Tenex)
Produce approximately 4-8 SWU per machine per year



European (TC-12)
Produce approximately 40-45 SWU
(Note: newer TC-21 model, in development, may produce up to 80 SWU)

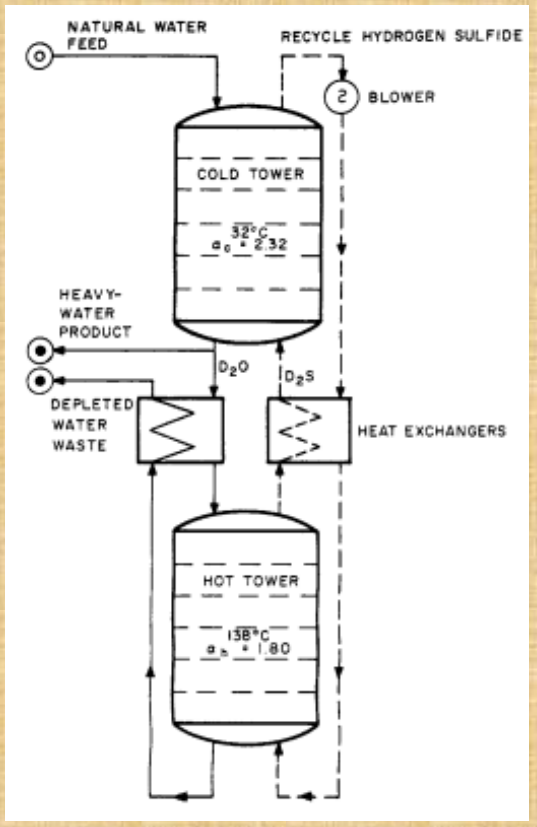
American Centrifuge
Produce approximately 350 SWU

USEC
A Global Energy Company

سانتریفوژ IR-8 ایران 24 kg SWU/year ⟵ هنوز راه درازی را در پیش داریم

مواد چرخه سوختی : ۱-آب سنگین؛ یک ماده استراتژیک هسته ای

در صورت تولید آب سنگین نیازی به غنی سازی اورانیم وجود ندارد و می توان با اورانیم طبیعی راکتور ساخت



فرآیند سولفید
مرحله اول تولید آب سنگین
تا ۱۵٪

برجهای تقطیر
مرحله دوم تولید آب سنگین
تا ۹۹/۸٪

کارخانه آب سنگین هندوستان (مشابه کارخانه آب سنگین اراک)

تولید آب سنگین در ایران≡ تولید مواد دوتریم دار با اهمیت برای تحقیقات شیمیایی و بیولوژیکی

عرضه ۷۲ محصول دوتره و نشاندار شده با ایزوتوپ دوتریم در حال حاضر

حلال های دوتره پر مصرف

اسیدها و بازهای معدنی دوتره

اسیدهای آلی دوتره

واکنشگرهای آلی دوتره

ترکیبات بیولوژیک دوتره

ترکیبات دوتره در حال تولید

ردیف	حلال های دوتره پر مصرف
1	Acetone-d_6 ≥ 99.5 atc
2	Chloroform-

ردیف
14
15
22

ردیف
33
34
35
36
37
38
39
40

ترکیبات دوتره در حال تولید
Benzene-d_6
Sodium borodeuteride
Potassium borodeuteride
Labeled methformine

Water, Deuterium-depleted (105 ppm)

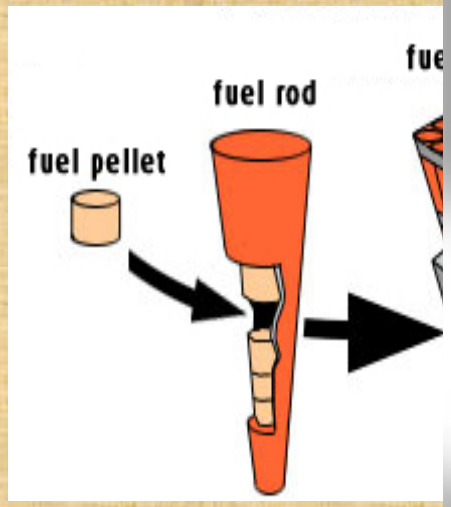
Double Labeled Water ($D_2{}^{18}O$) 10 atom% D, ^{18}O

گرافیت هسته ای:

پخت گرافیت در دمای 2500-3000 ^{o}C توسط کوره های اتصال مستقیم (Acheson) انجام می شود، اخیراً ایران به این فناوری دست یافته است

ساخت میله های سوخت:

میله های سوخت اساساً از قرصهای اکسید اورانیم که در غلاف زیرکالوی جا داده شده اند تشکیل می گردند



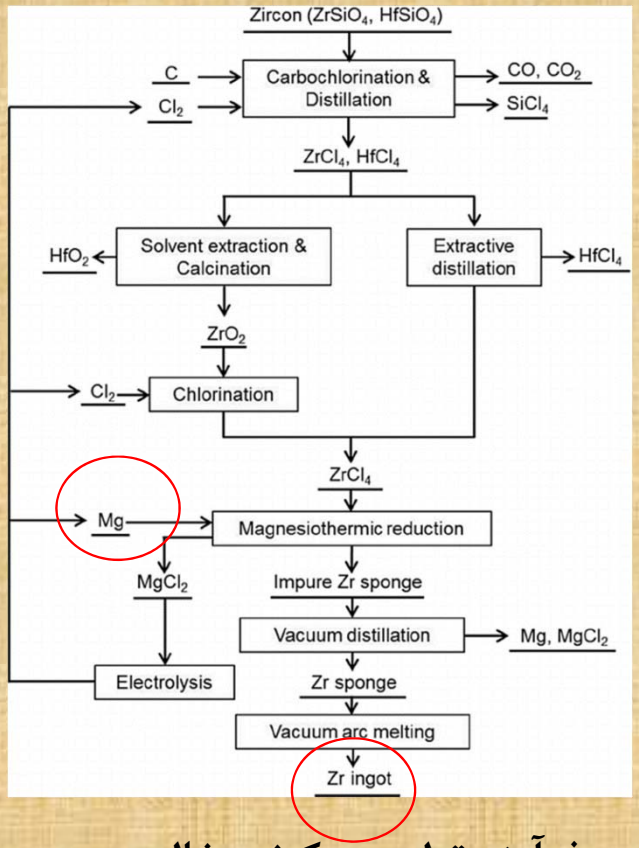
جزاء یک بسته سوخت

کوره تونلی $2000\ ^oC$ با اتمسفر هیدروژن-آرگون برای سینترینگ پیوسته قرص های UO_2 (مشابه کارخانه UCF اصفهان)

میله های

بسته سوخت

ساخت غلاف میله های سوخت: زیر کالوی (آلیاژ زیرکونیم و نیوبیم)



فرآیند تولید زیرکونیم خالص

فلز منیزیم
(کارخانه ZPP اصفهان)

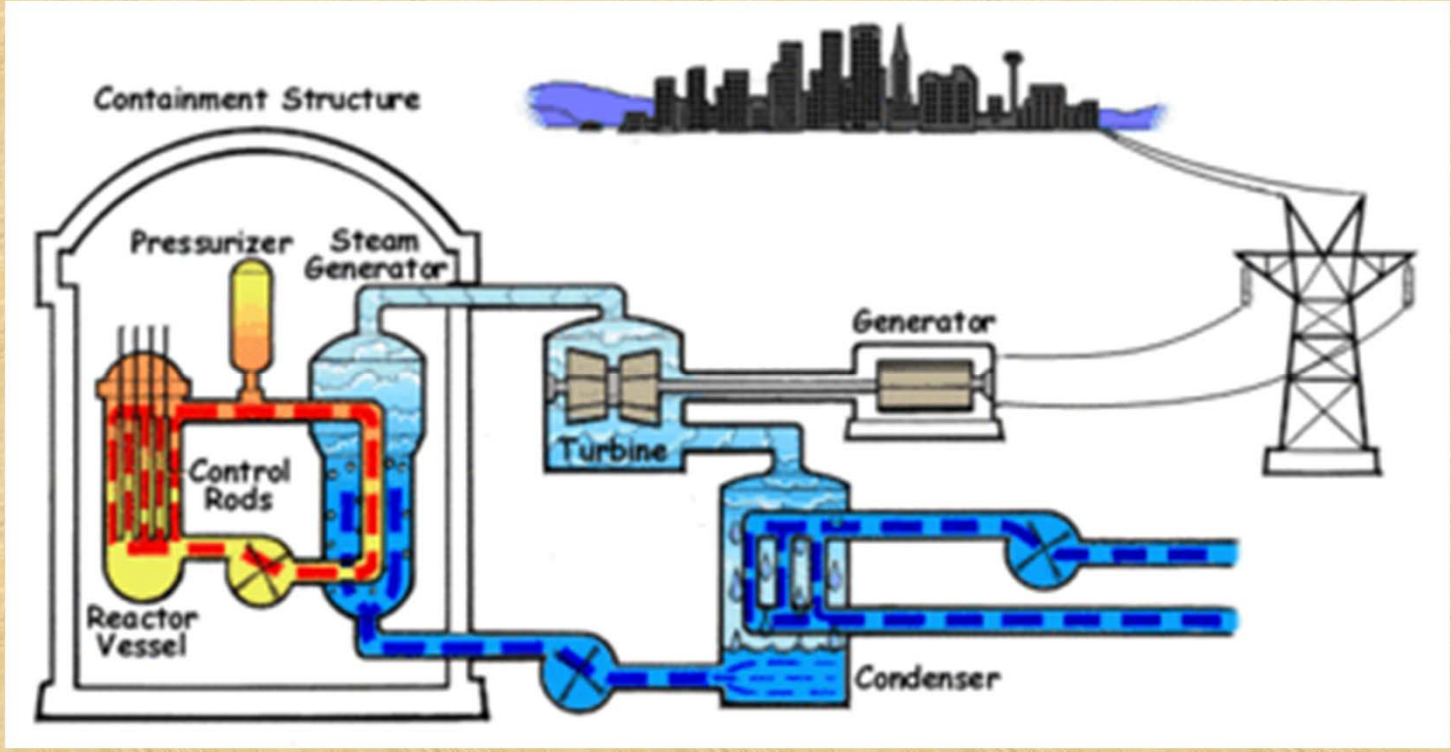
فلز زیرکونیم (کارخانه ZPP اصفهان)
قیمت جهانی 220 $/kg

لوله زیرکونیم (غلاف سوخت)

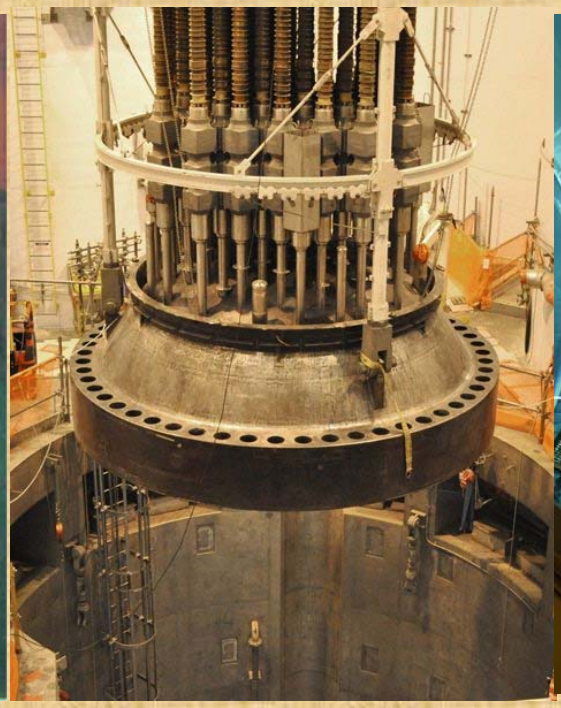
مراحل تولید لوله غلاف زیرکونیم با روش اکستروژن

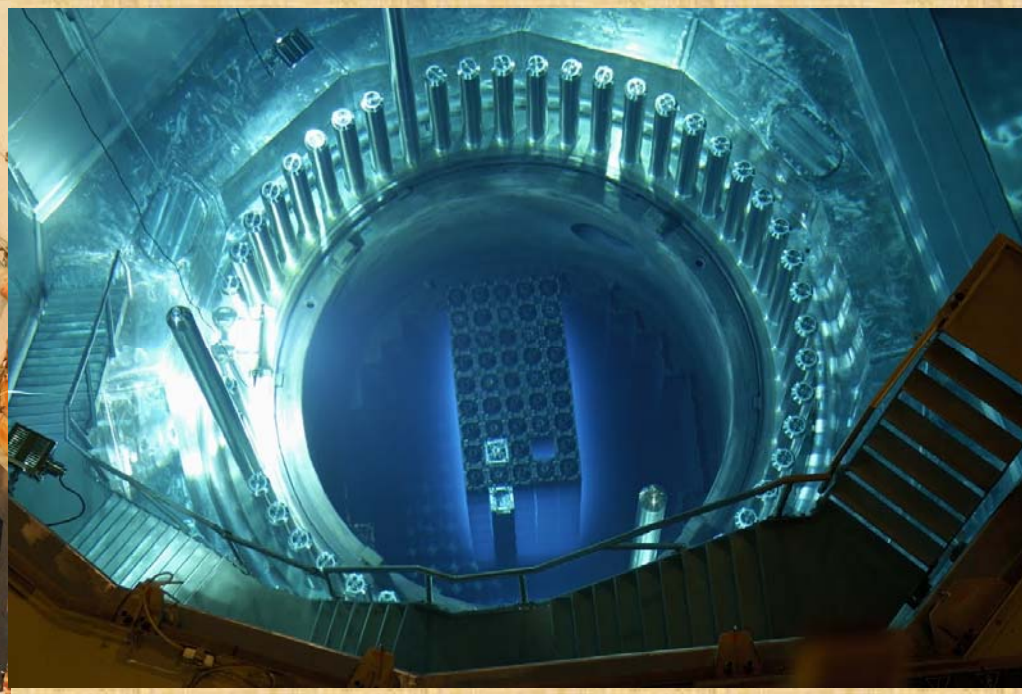
کارکرد سوخت در راکتور: اغلب سوختها در راکتور PWR بین ۳ تا ۵ سال می مانند.

مدیریت سوخت: نحوه چیدن سوختهای تازه و کارکرده برای استحصال ماکزیمم انرژی

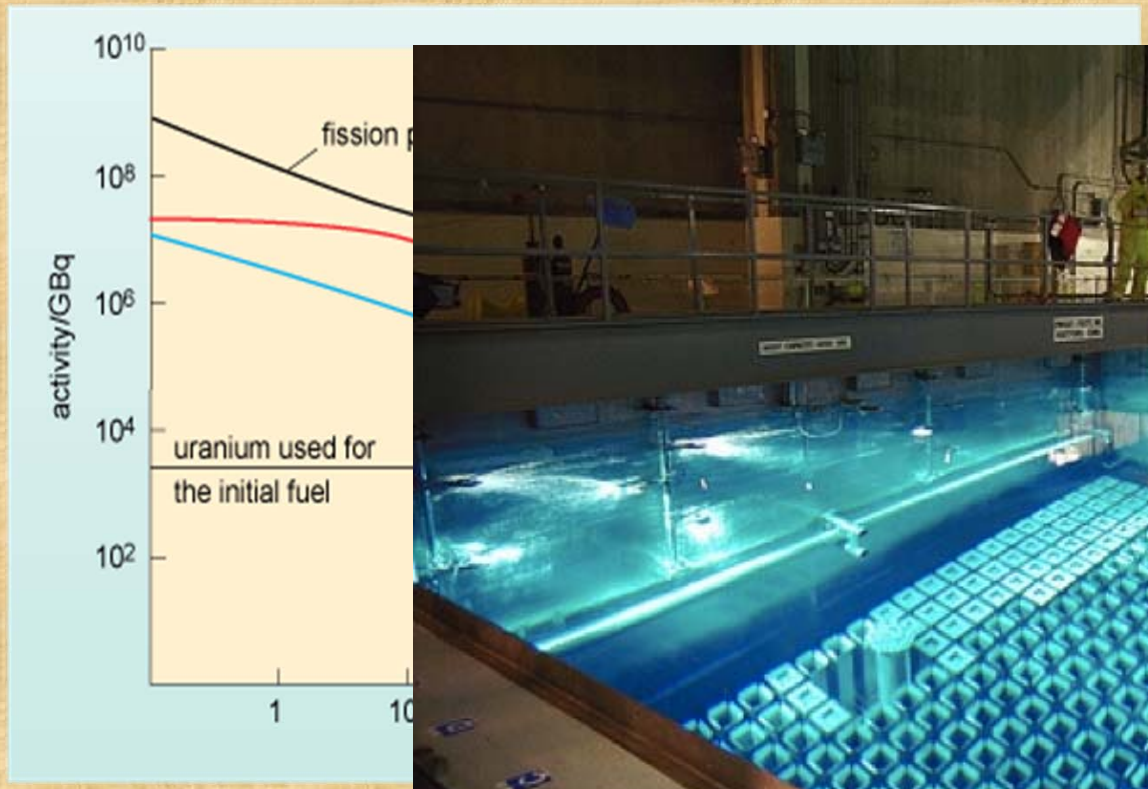


تعویض سوخت راکتور: فرآیندی پیچیده و حساس

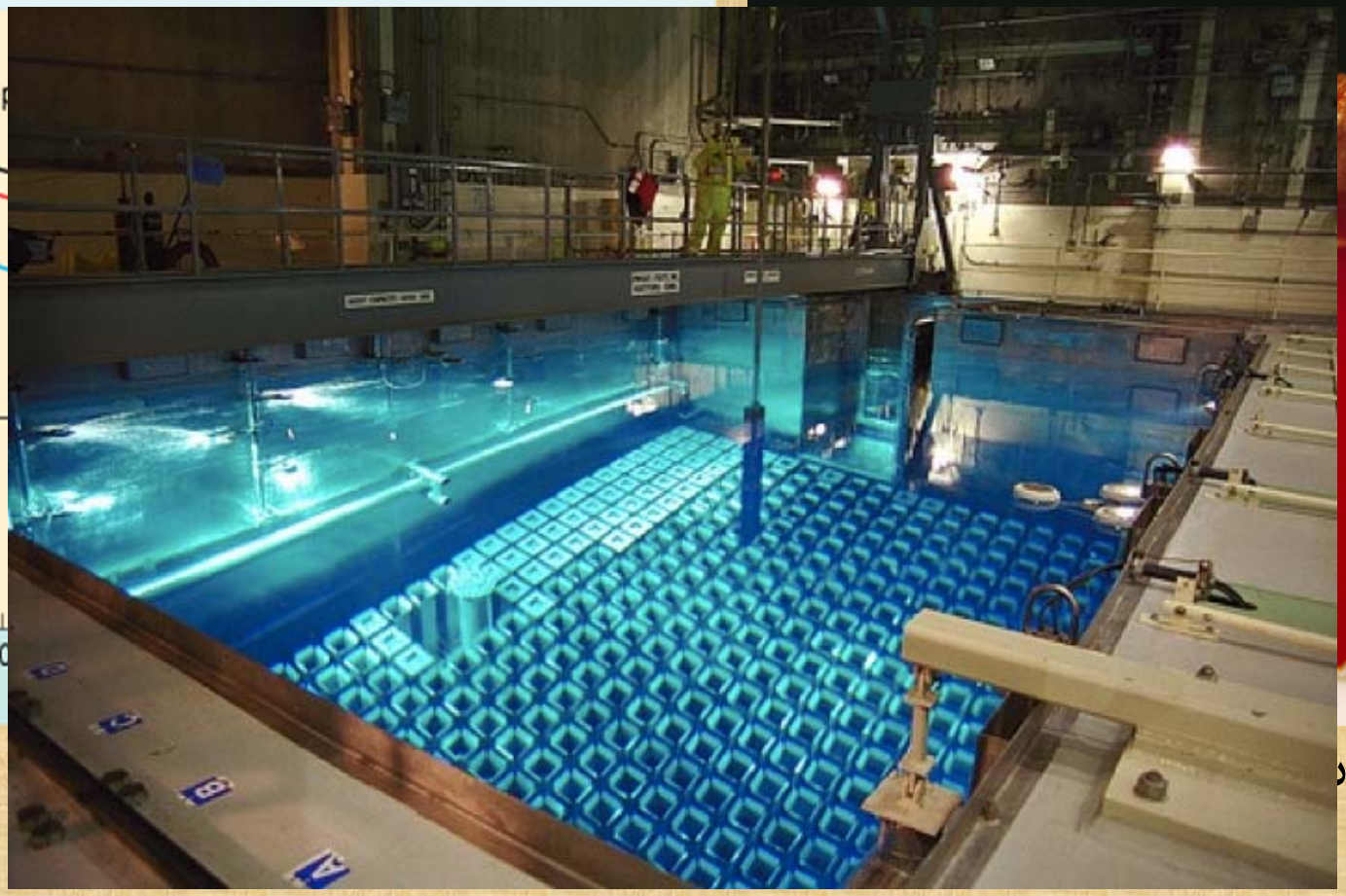




پسمانداری سوخت های فرسوده: یکی از مهمترین چالش های مهندسی هسته ای



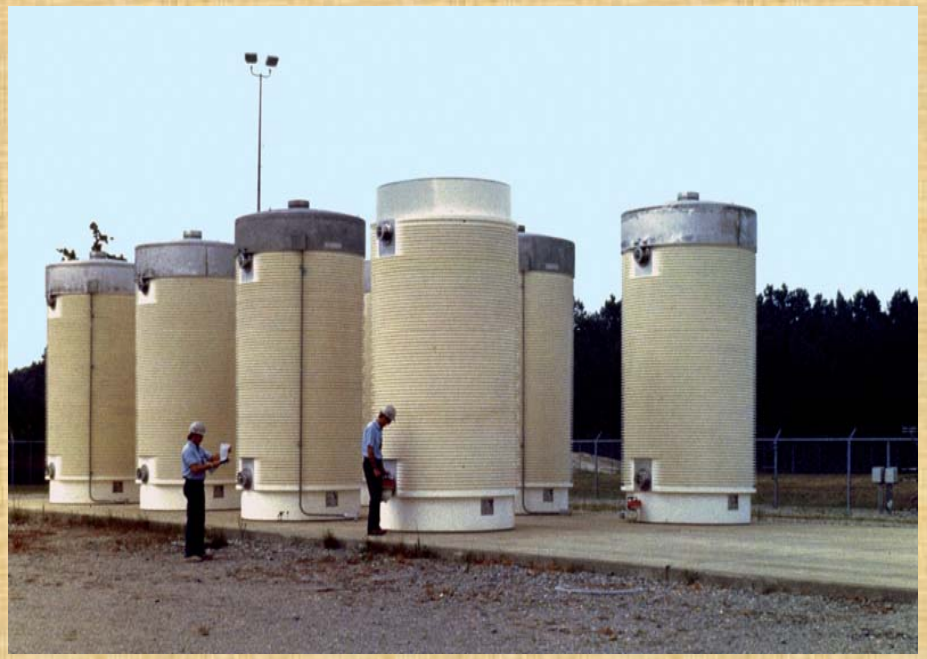
خروجی از راکتور



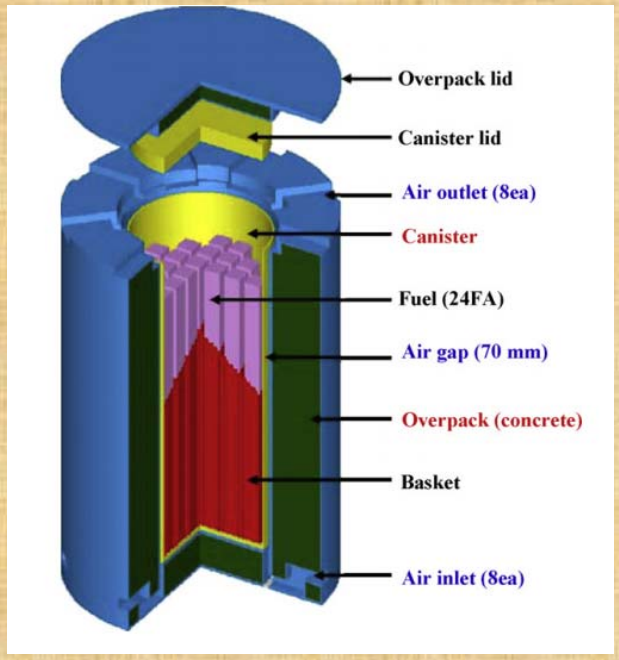
نمایش سرخ شدن
باقیمانده در

استخر نگهداری سوخت های فرسوده

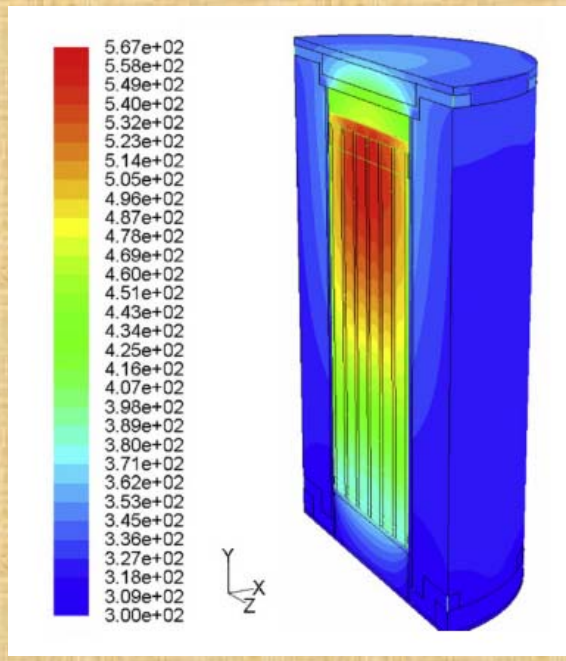
رهیافت های جدید در پسمانداری: روش های خشک



محفظه نگهداری خشک سوخت فرسوده



اجزاء داخلی محفظه نگهداری



مدل انتقال حرارتی محفظه

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (1)$$

بقاء مومنتم

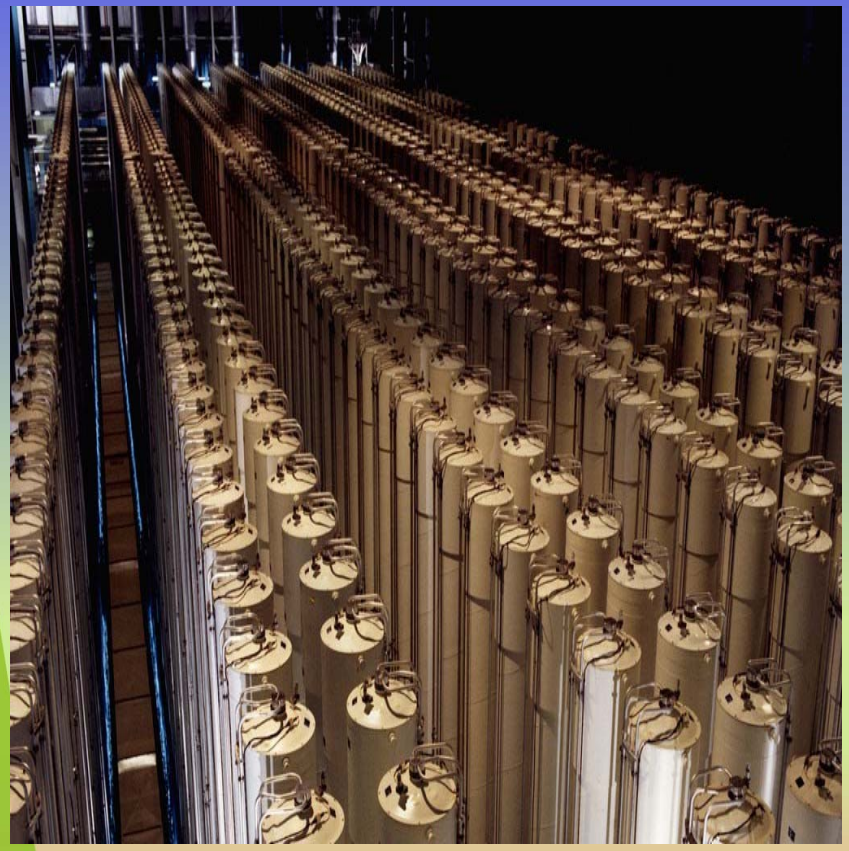
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u_i' u_j'}) \qquad (2)$$

بقاء انرژی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\kappa + \kappa_t)\frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}\sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + \frac{DP}{Dt}\tau_{ik}\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \qquad (3)$$

زمینه های پژوهشی چرخه سوخت
مهندسی فرآیند
جداسازی ایزوتوپی
نانو فناوری در چرخه سوخت
تولید رادیوایزوتوپها
پسماندداری هسته ای

۱- جدا سازی ایزوتوپی



۱-۱ سانتریفوژ گازی :

کارهای انجام شده

- اثر گرادیان دمایی بر روی ضرایب جداسازی اورانیم
- جداسازی گازهای فریون ۱۲ و ۲۲ با سانتریفوژ گازی
- مدل سازی سانتریفوژ با تزریق گازهای غیر اورانیمی

پروژه های پیشنهادی:

- بهینه سازی آبشار با در نظر گرفتن قیود بنیادی
- جداسازی ایزوتوپهای غیر اورانیمی با سانتریفوژ

۱- جدا سازی ایزوتوپی

۱-۲ جداسازی ایزوتوپی بور:

کارهای انجام شده

- سنتز ترکیبات مورد نیاز برای جدا سازی ایزوتوپی بور
- تقطیر ترکیب دی اتیل اتر+ بورون تری فلوراید
- تقطیر ترکیب دی متیل اتر+ بورون تری فلوراید

۱- جدا سازی ایزوتوپی

۱-۲ جداسازی ایزوتوپی لیتیم و هیدروژن:

کارهای انجام شده

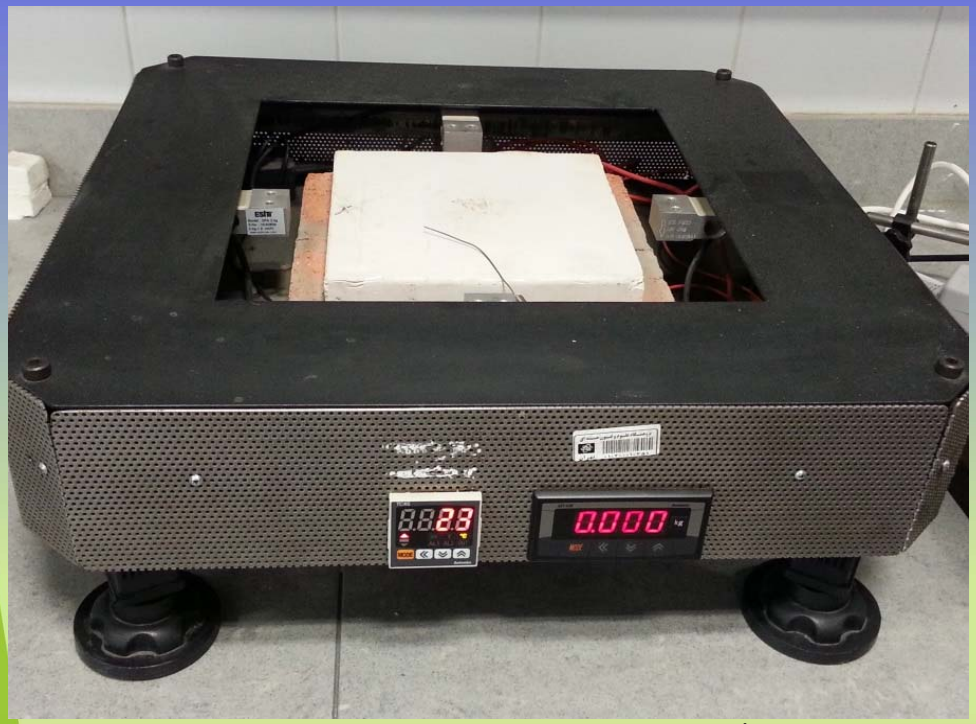
- الکترولیز آمالگام ناپیوسته
- الکترولیز آمالگام پیوسته
- مدل سازی ضرایب جداسازی ایزوتوپی
- الکترولیز و کپسول سازی گاز دوتریم

پروژه های پیشنهادی:

- پروژه های پیشنهادی کارخانه آب سنگین

۲- انتقال حرارت

۲-۱: بررسی ضرایب انتقال حرارت در تصعیدگازها :

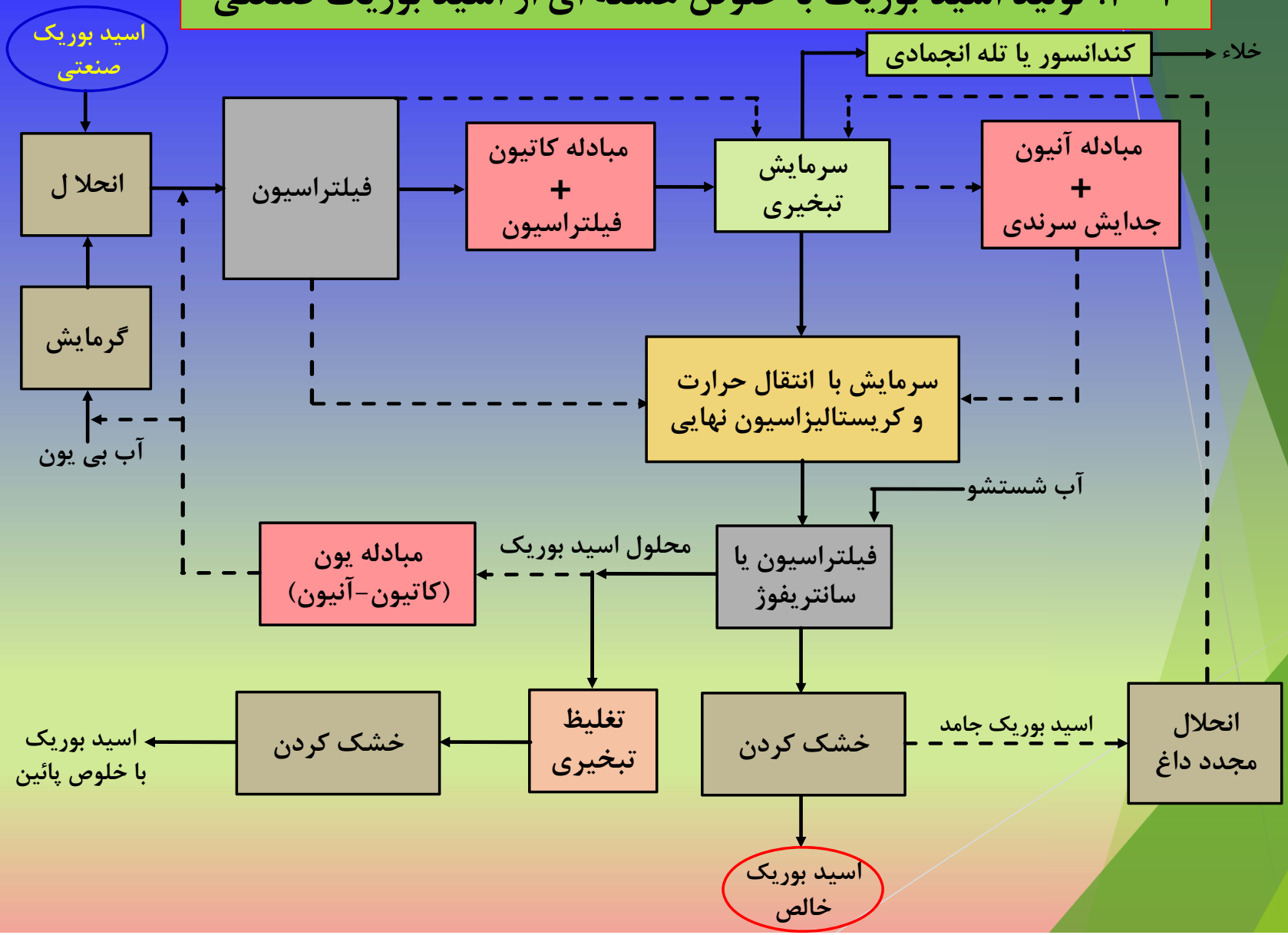


کارهای انجام شده

- بررسی تجربی ضرایب انتقال حرارت تصعیدی
- مدل سازی انتقال حرارت

$$\rightarrow h_{sub} = \left(\frac{K_{gas} L \Delta H_{sub}}{A(T_w - T_s)} \sqrt{\frac{۲mg\rho_{gas}}{A}} \right)^{۰/۵}$$

۳- ۲: تولید اسید بوریک با خلوص هسته ای از اسید بوریک صنعتی



۳- مهندسی فرآیند

۳-۳: کاربرد مایکرویو در تولید UO2