

**УНТЦ, Київ**

**Ядерна боєголовка:  
розгляд прикладу загрози з боку КНДР і ядерні реактори**

**Анджело Мінотті, PhD**

# Зміст (1/2)

- МБР:
  - Роздільна головна частина індивідуального наведення (MIRV)
  - Доставка
  - Траєкторія входу у щільні шари атмосфери
- Загроза з боку КНДР
  - Профілі швидкостей ракет «Хвасон-12» і «Хвасон-14»
  - Випробування водневого боєзаряду
- Термоядерний боєзаряд
  - Як він працює, і його головні компоненти
  - Канал закупівлі
- Реактори та їх цілі:
  - Енергетичні реактори
  - Дослідні реактори

## Зміст (2/2)

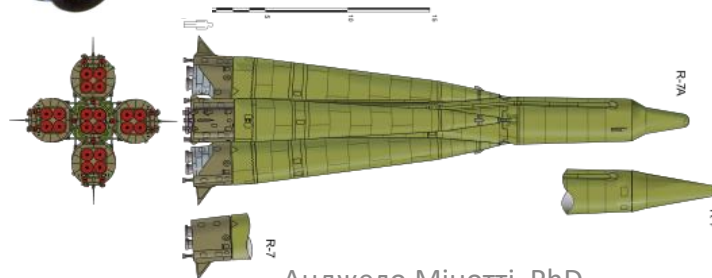
- Реактори:
  - Конструкція, компоненти та матеріали
  - Паливо
    - Ланцюгова реакція
    - Критична маса, і як її досягають у ядерній зброї
  - Пробки
  - Стрижні управління та захисту (СУЗ)
  - Сповільнювач
  - Корпус реактора
- Процес збагачення
- Принцип гарантій (МАГАТЕ та ЄВРАТОМ)
- Незаконна торгівля: мережа закупівлі газових центрифуг для Лівії
- Схема розповсюдження
- Окремі приклади кримінальних справ

# МБР (1/3)

Міжконтинентальна балістична ракета призначена, головним чином, для доставлення ядерної зброї (однієї або кількох термоядерних боєголовок).

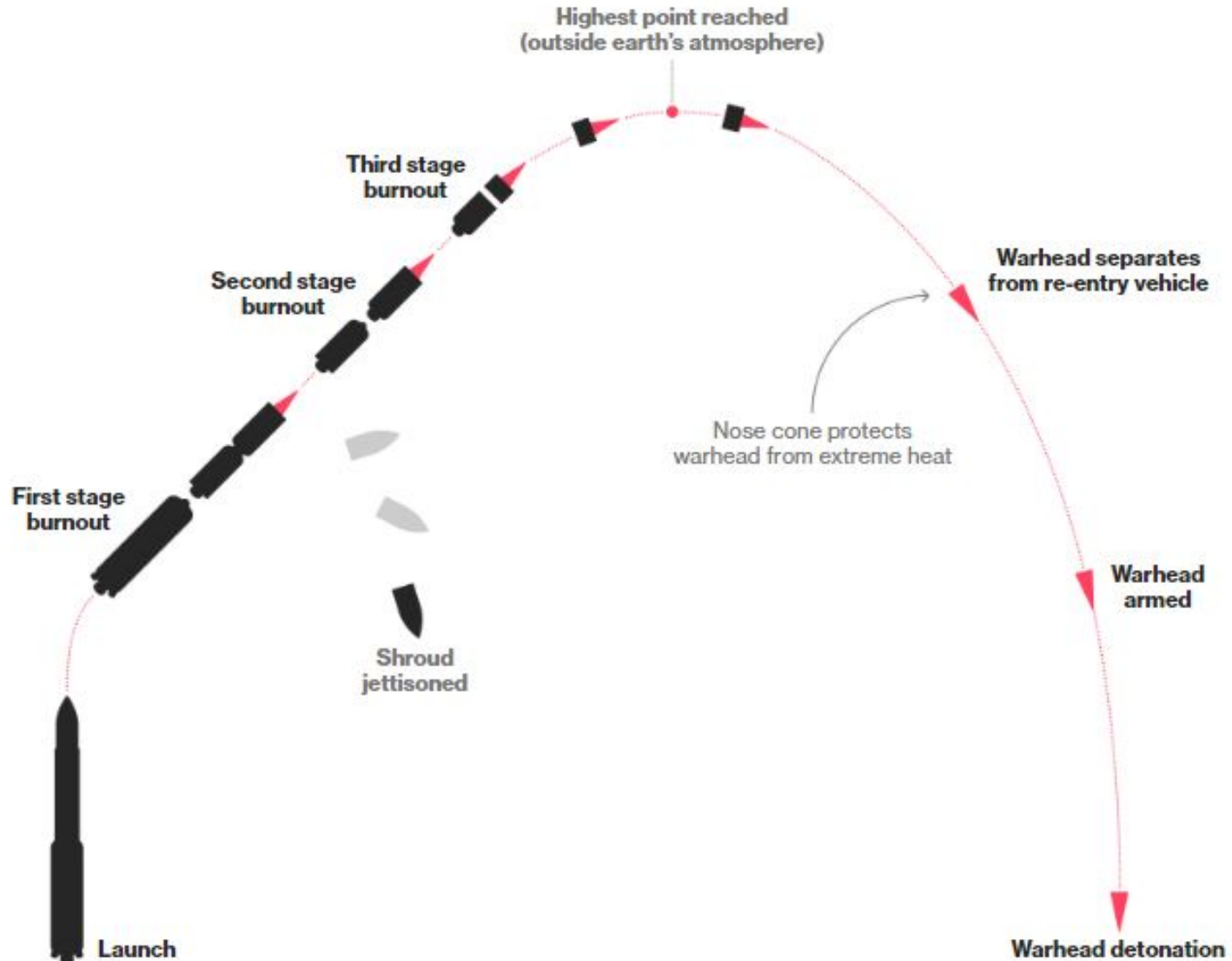
Подібним чином, звичайна, хімічна та біологічна зброя може доставлятися з різною ефективністю, однак ніколи не доставлялася за допомогою МБР.

Найсучасніші конструкції розраховані на використання роздільної головної частини індивідуального наведення (МІРВ), яка дозволяє одній ракеті нести декілька боєголовок, кожна з яких може наносити удар по окремій цілі.



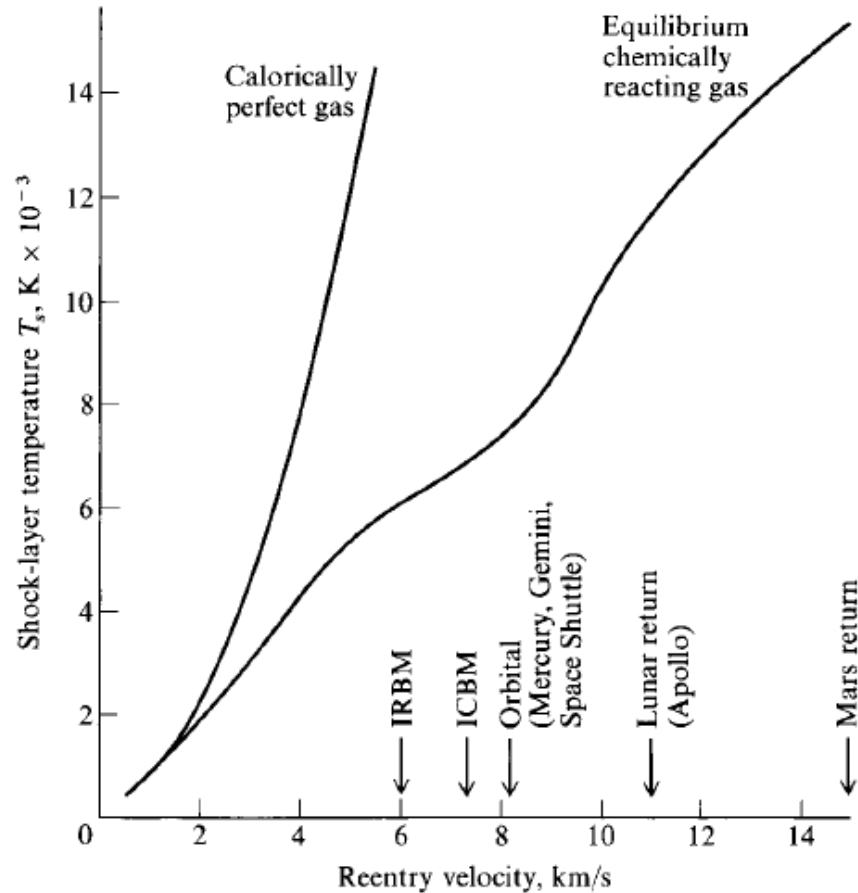
# МБР (2/3)

## How an ICBM Delivers the Bomb



# МБР (3/3)

## Теплофізичні характеристики



**Fig. 1.18** Temperature behind a normal shock wave as a function of freestream velocity at a standard altitude of 52 km (from [4]).

# NORTH KOREAN STRATEGIC NUCLEAR THREAT

## 조선전략적핵무력건설



### Thermonuclear Bomb

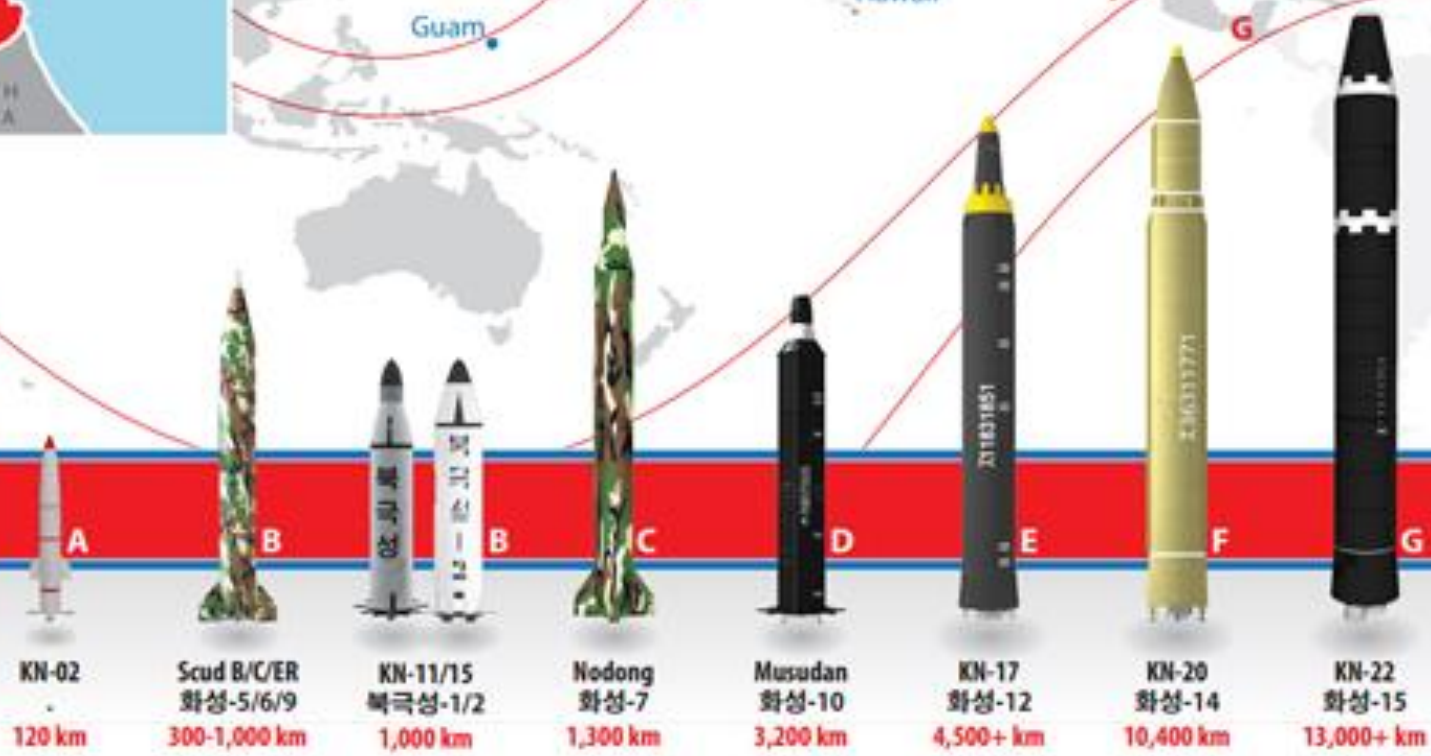
On September 3, 2017, North Korea tested a staged thermonuclear weapon that exploded with a force equivalent to a few hundred kilotons of TNT.



For more resources on North Korea, please visit: [www.nti.org/northkorea](http://www.nti.org/northkorea)

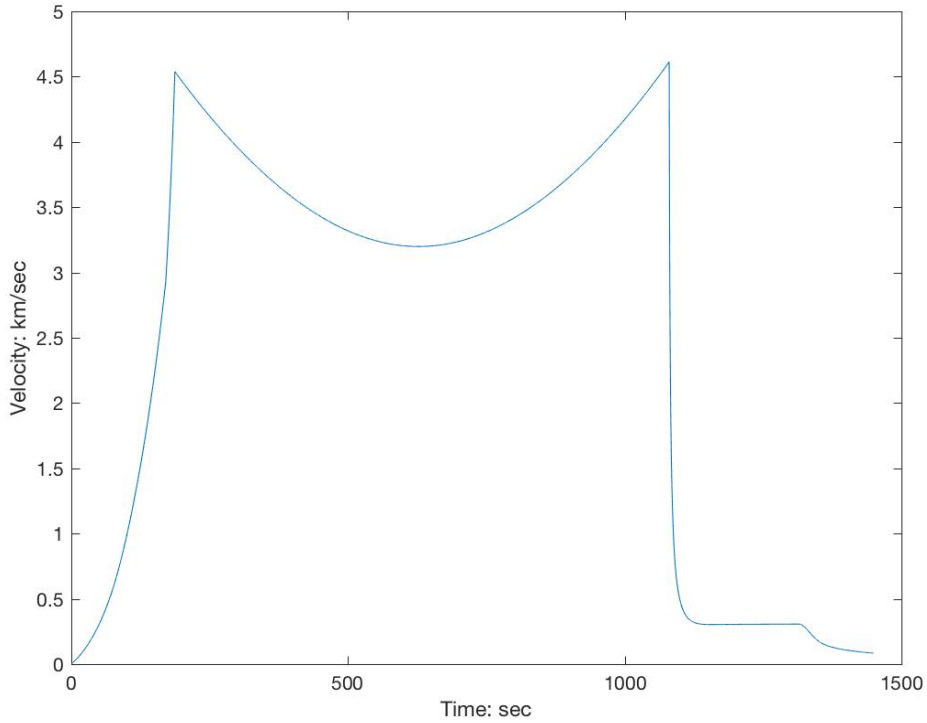
Source: James Martin Center for Nonproliferation Studies; Nuclear Threat Initiative.

February 2018

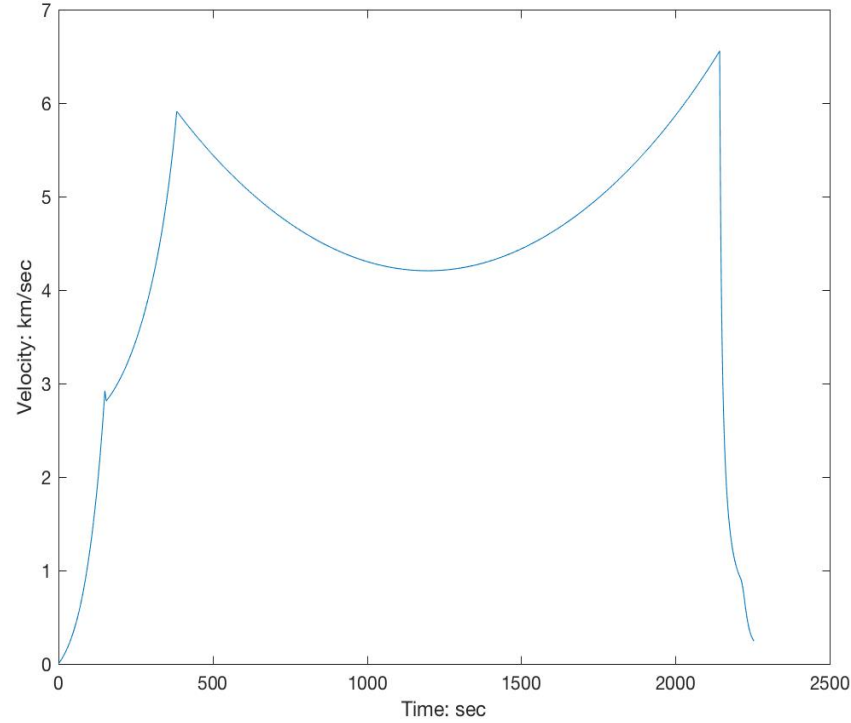


# Швидкість і час підльоту X-12 і X-14

«Хвасон-12»



«Хвасон-14»





# Випробування водневого боєзаряду Північною Кореєю

Згідно з офіційною заявою Північної Кореї, «КНДР успішно випробувала водневу боєголовку для МБР на північному випробувальному полігоні КНДР о 12:00 3 вересня...»

«...сила вибуху якої може коливатися від десятків кілотонн до сотень кілотонн, є багатофункціональною термоядерною зброєю великої руйнівної сили, яку можна підривати навіть на великій висоті для створення надпотужного ЕМІ в залежності від стратегічних цілей».

Початковий звіт Геологічної служби США (USGS) спершу визначив магнітуду на рівні 5.2 балу, однак надалі швидко збільшив оцінку події до 6.3 балу.



# Водневий боєзаряд всередині ракети Х-14 (оцінка)



# Водневий заряд: як він працює (1/3)

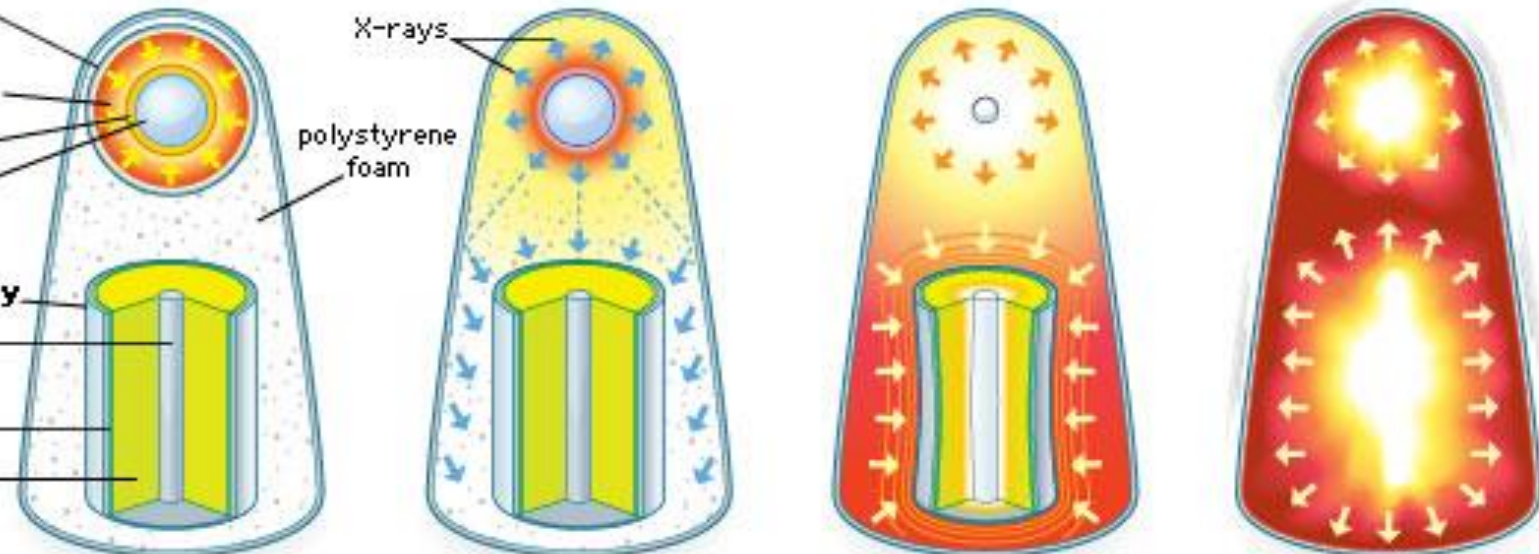
## Teller-Ulam two-stage thermonuclear bomb design

### boosted fission primary

chemical explosion  
heavy metal case  
fission fuel

### fusion secondary

fissionable "spark plug"  
uranium tamper  
fusion fuel



1. Chemical explosion compresses fission fuel to initiate fission.

2. X-rays from primary are reflected by casing and heat foam.

3. Foam, now a plasma, compresses secondary; fissionable "spark plug" ignites.

4. Fusion fuel ignites.

© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

Для двох термоядерних зарядів (випробувальної бомби «Айві Майк» і сучасного варіанту боєголовки проекту W-61 для крилатої ракети W-80) радіаційний тиск був розрахований на рівні 73 млн. бар (атмосфер) (7,3 ТПа) для проекту «Айві Майк» і 1,4 млн. бар (0,14 ТПа) для W-80.

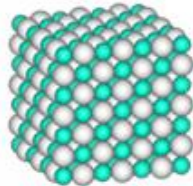
# Водневий боєзаряд (2/3)

2-ступінчаста  
бомба:  
ділення + синтез

2009 viewzone.com

The primary detonator is a small "atom bomb" used to generate high energy neutrons and thermal pressure.

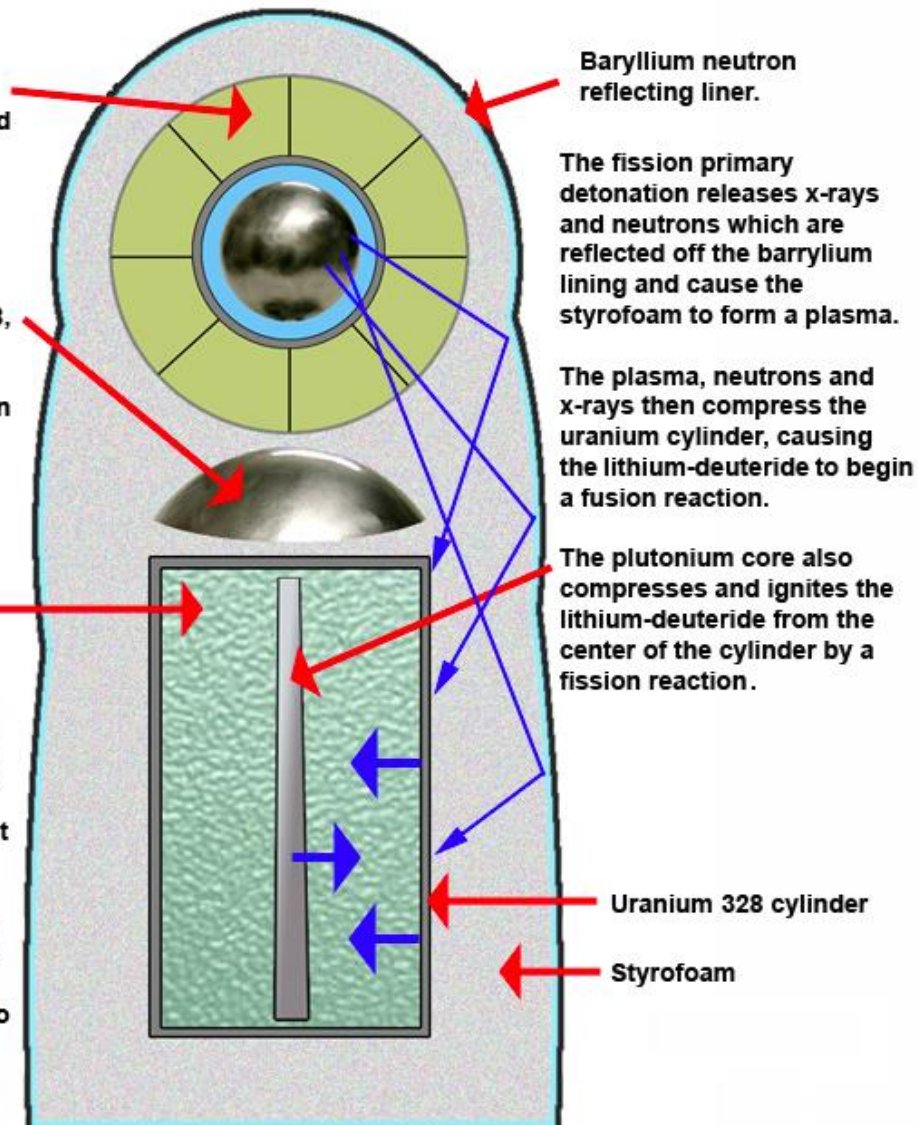
The reflector, usually U238, prevents the heat from reaching the secondary cylinder before the neutron and x-ray can detonate it.



Lithium-Deuteride (DT)  
A dry powder containing lithium(6) and deuterium.

This is the actual fuel that will create the fusion.

The lithium will absorb a neutron and transform to tritium, then the tritium and deuterium will fuse to form Helium and a free neutron, releasing 17.6 MeV in energy.



Beryllium neutron reflecting liner.

The fission primary detonation releases x-rays and neutrons which are reflected off the beryllium lining and cause the styrofoam to form a plasma.

The plasma, neutrons and x-rays then compress the uranium cylinder, causing the lithium-deuteride to begin a fusion reaction.

The plutonium core also compresses and ignites the lithium-deuteride from the center of the cylinder by a fission reaction.

Uranium 238 cylinder

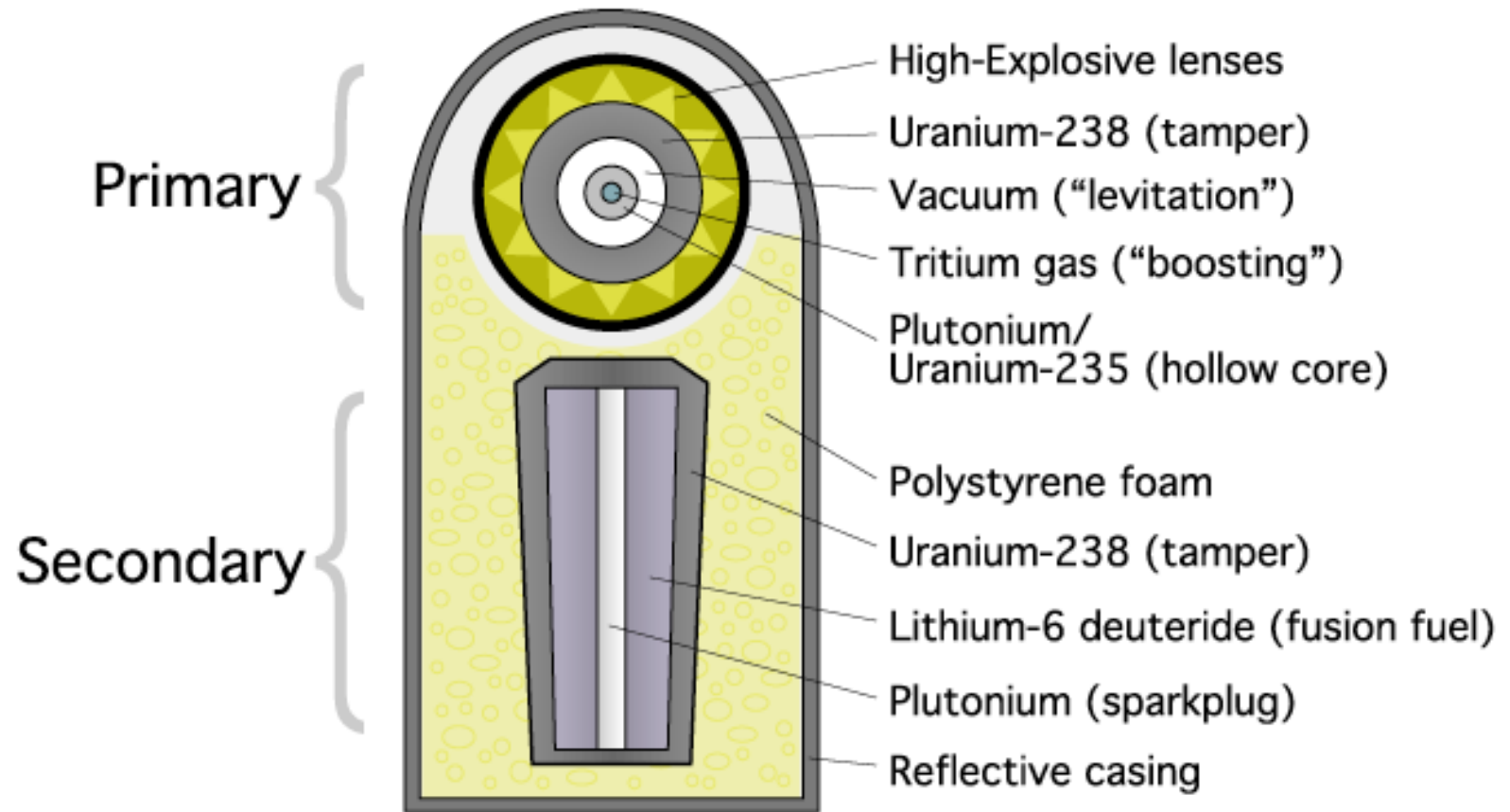
Styrofoam



Once the above reaction is initiated with a neutron, the result yields helium, energy and another free neutron to keep the reaction going.

# Водневий боєзаряд (3/3)

## Основні компоненти



# Канал закупівлі (1/2)

## Навіщо контролювати реактор, реакторні технології і ядерний паливний цикл?

Ядерний паливний цикл: процес видобування, збагачення, очищення, використання і утилізації ядерного палива.

Розчин оксиду урану ( $U_3O_8$ ).  
Концентрат цього оксиду називається «жовтий кек».

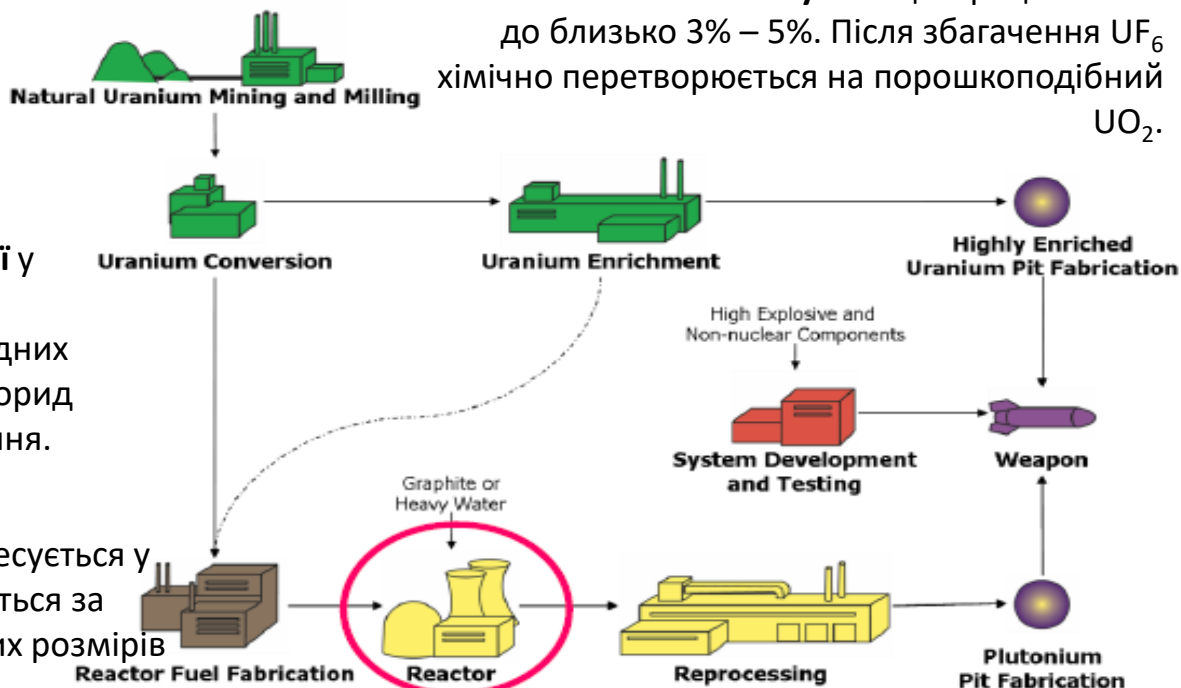
Високоочищений триоксид урану ( $UO_3$ ).

$UO_3$  піддається **конверсії** у діоксид урану ( $UO_2$ ) для застосування у важководних реакторах або у гексафторид урану ( $UF_6$ ) для збагачення.

Природний або збагачений порошок  $UO_2$  пресується у малі циліндричні таблетки, які надалі спікаються за високих температур і обробляються до точних розмірів

Уран-235 – ізоотп урану, концентрація якого у природному урані лише 0,7%.

**Збагачення збільшує** концентрацію U-235 до близько 3% – 5%. Після збагачення  $UF_6$  хімічно перетворюється на порошкоподібний  $UO_2$ .



## Чому реактор контролюють за регламентом про подвійне застосування, а не за законодавством про військове майно?

Тому що реактор – це цивільна установка, призначена для виробництва енергії

# Канал закупівлі (2/2)

## За чим необхідно наглядати на атомній електростанції?

- Контейнери для відпрацьованого палива
- Роботи за відкритої активної зони
- Роботи та діяльність в басейні витримки або поряд з ним
- Переміщення ядерних матеріалів до реакторного залу або з нього
- Обладнання МАГАТЕ
- Переміщення відпрацьованого палива до сухого сховища
- Змішане оксидне паливо, що зберігається у басейні витримки

# РЕАКТОРИ та їх ЗАСТОСУВАННЯ

## Енергетичні реактори

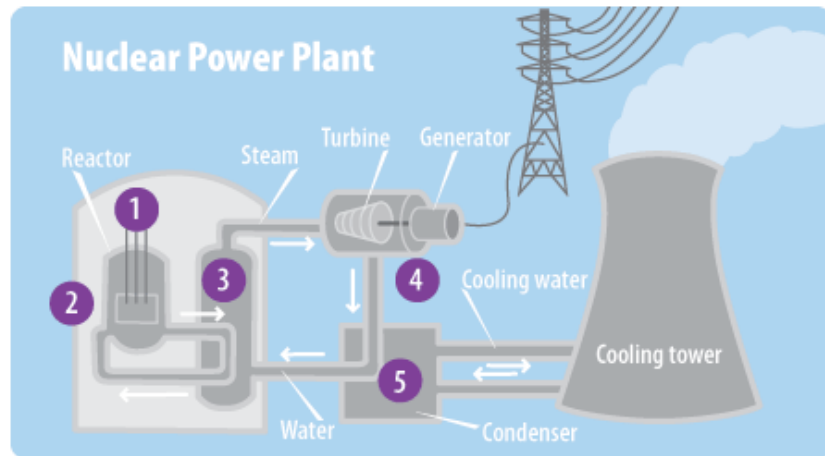
- Ядерні реактори використовуються у атомних електростанціях для виробництва електроенергії і як корабельні рушійні установки. Теплова енергія, що вивільнюється при ядерному діленні, передається на теплоносій (воду або газ), який проходить через парові турбіни. Вони рухають корабельні гвинти або обертають електричні генератори.

## Дослідні реактори

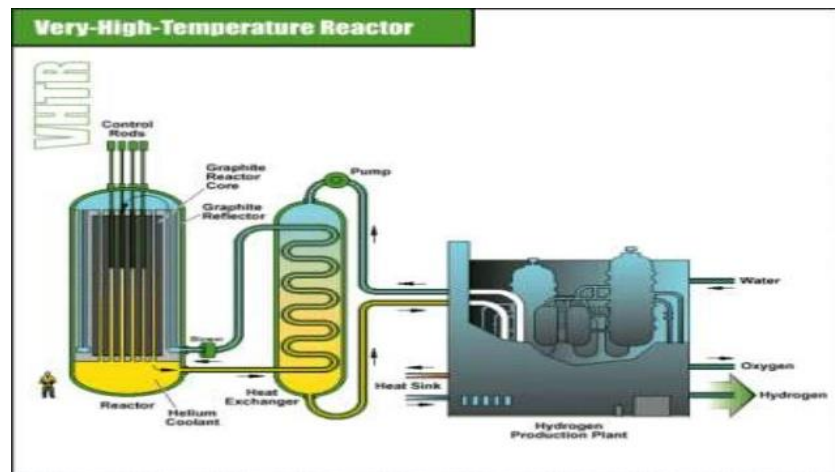
- Використовуються для розробки зброї або технологій виробництва електроенергії, в учбових цілях, для експериментів у галузі фізики і для виробництва радіоізотопів для медичних і дослідних застосувань (реактори IV покоління).

## Промислові реактори

- Використовуються для виробництва матеріалів, що можуть застосовуватися у ядерній зброї



*АЕС для виробництва електроенергії*



*Високотемпературний реактор IV покоління*



# РЕАКТОРИ для ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

## Легководні реактори (ЛВР)

- Реактори на воді під тиском (PWR)
- Реактори на киплячій воді (BWR)
- Водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР)

## Важководні реактори під тиском (НУWR)

- Канадський важководний урановий реактор (CANDU)
- Вдосконалений важководний реактор (AHWR)

## Газоохолоджувані реактори з графітовим сповільнювачем (GCR)

- Магнієвий неокислюваний реактор (MAGNOX)
- Вдосконалений газоохолоджуваний реактор (AGR)

## Легководні реактори з графітовим сповільнювачем (LWGR)

- Реактор великої потужності киплячий (РБМК)
- Канальний ядерний реактор з графітовим сповільнювачем (PTGR)

## Рідкометалеві реактори (LMR)

- Реактор-розмножувач з рідкометалевим охолодженням (LMFBR)

# РЕАКТОРИ для ДОСЛІДЖЕНЬ та ВИПРОБУВАНЬ

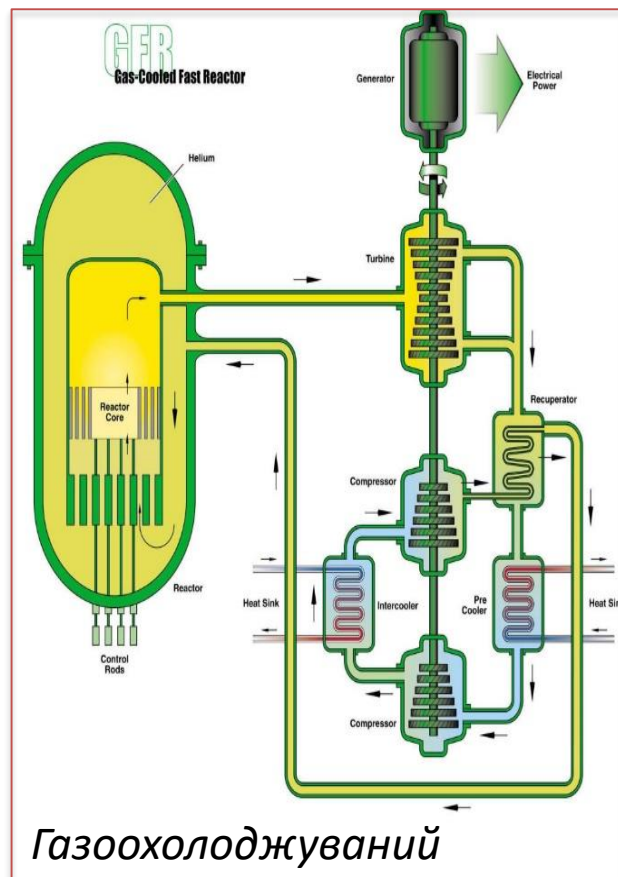
Значна кількість ядерних реакторів, що існують у світі, використовуються для досліджень та навчання, випробування матеріалів або виробництва радіоізотопів для медицини та промисловості.

- Вони значно менші за енергетичні реактори; багато з них знаходяться на території університетів.
- У роботі знаходяться 283 таких реактори у 56 країнах (серпень 2003 р.)
- Основне завдання дослідних реакторів – забезпечити джерело нейтронів для дослідів та інших цілей.

-Види: басейнові, корпусні, гомогенні, критичні (реактори нульової потужності), швидкі, графітові, імпульсні, PWR, BWR, ракетні, термоіонні

-Збагачене паливо: уранове, плутонієве, алюмінієва оболонка, інколи – оболонка з нержавіючої сталі або магнію.

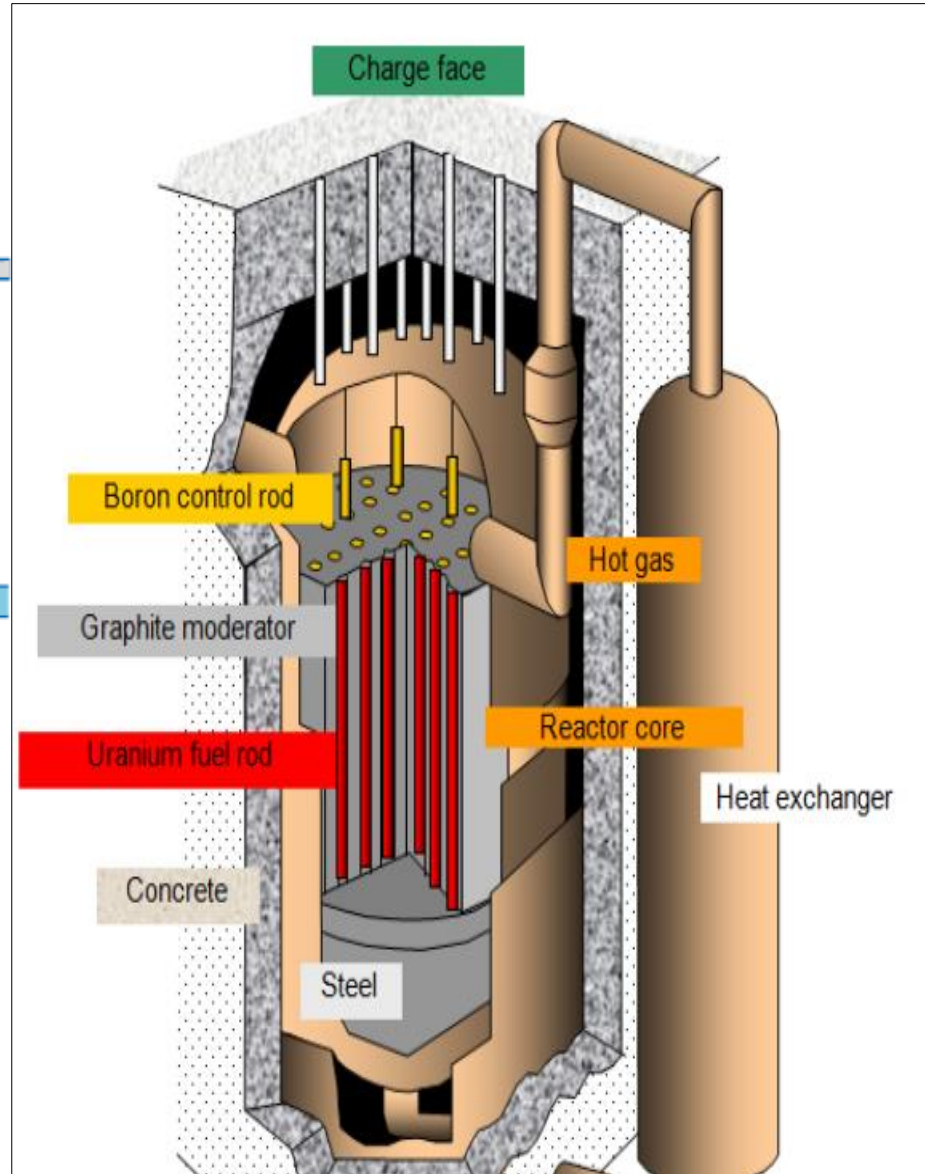
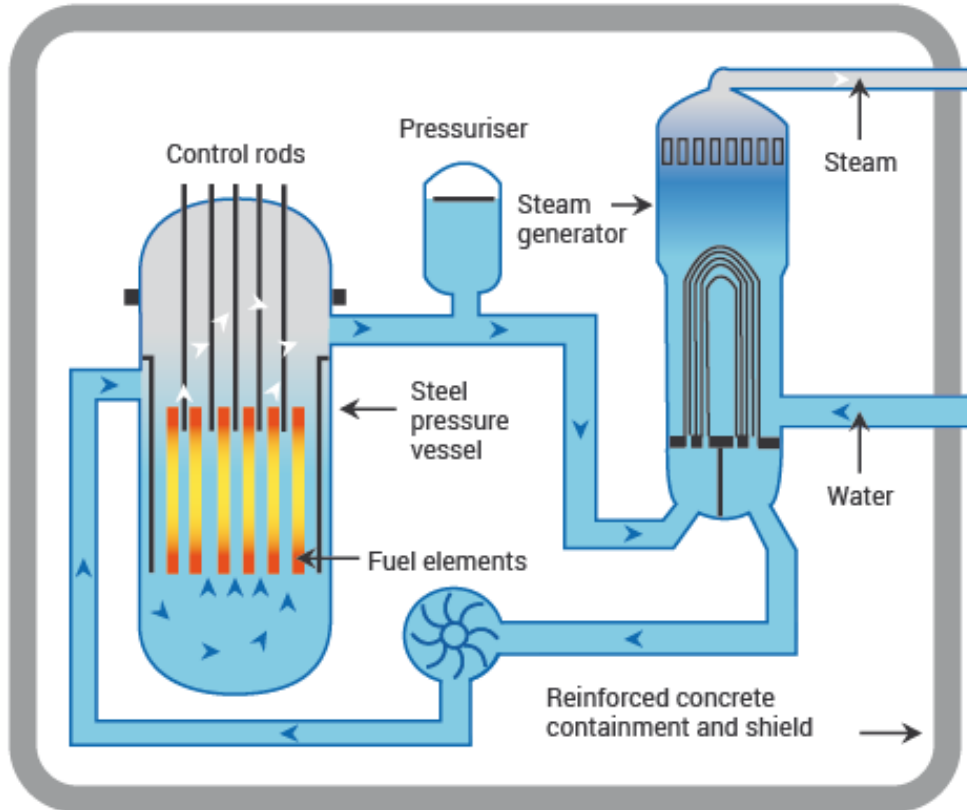
-Форми палива: уран (метал, оксиди), уран-алюміній, силіциди урану, рішення на основі сульфату урану, уран-гідрид цирконію, уран, диспергований у графіті; плутоній (метал, оксиди, карбіди)



*Газоохолоджуваний швидкий реактор (GFR)*

# РЕАКТОРИ: КОНСТРУКЦІЯ

A Pressurized Water Reactor (PWR)



# РЕАКТОРИ: ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ ТА ВІДПОВІДНІ МАТЕРІАЛИ

КОМПОНЕНТ	МАТЕРІАЛ
Паливо	Уран, плутоній
Сповільнювачі	<ul style="list-style-type: none"><li>- Водень, дейтерій, графіт, берилій</li><li>- Сповільнювачі на основі важкої води або графіту дозволяють використовувати природний уран, усуваючи потребу у збагаченні</li></ul>
Теплоносії	Легка вода, важка вода, гелієво-повітряна суміш, рідкий метал
СУЗ	Гафній, бор, кадмій
Біозахист	Свинець, бетон, сталь, вода
Корпус реактора	Сталь
Канали під тиском	Сталь
Робочі канали	Цирконій, циркалой
Трубопроводи першого контуру	Сталь
Теплообмінники (парогенератори)	Сталь
Перевантажувальна машина	Сталь

# РЕАКТОРИ: ПАЛИВО

Ядерне паливо – речовина, яка використовується на атомних електростанціях для виробництва теплової енергії для парових турбін. Теплова енергія утворюється, коли у ядерному паливі відбувається ядерне ділення.

Більшість видів ядерного палива містять важкі елементи, здатні до розщеплення, які підтримують ядерне ділення, на зразок **урану-235** або **плутонію-239**.

Коли в нестабільне ядро такого атома ударяє повільний нейтрон, **воно розщеплюється**, створюючи два дочірніх ядра і ще два або три нейтрони.

Ці нейтрони розщепляють додаткові ядра.

**Таким чином утворюється самопідтримувана ланцюгова реакція, керована у ядерному реакторі і некерована у ядерній зброї.**

**ОКСИДНЕ ПАЛИВО ДЛЯ РЕАКТОРІВ ДІЛЕННЯ:** паливо (зазвичай, на основі урану), як правило, складається з оксиду металу; оксидам віддається перевага перед чистими металами, оскільки температура плавлення оксиду набагато вища, ніж інших металів, і оскільки вони не можуть горіти, вже знаходячись у окисленому стані.

**РЕАКТОРИ НА МЕТАЛЕВОМУ ПАЛИВІ:** Металеве паливо має перевагу набагато вищої теплопровідності, ніж оксидне паливо, однак не може використовуватися за дуже високих температур, як оксиди.

**КЕРАМІЧНЕ ПАЛИВО:** Керамічне паливо, яке не відноситься до оксидів, має перевагу високої теплопровідності і високої температури плавлення, однак є більш схильним до розпухання, ніж оксидні палива, і менше вивчене.

# ПАЛИВО: ЛАНЦЮГОВА РЕАКЦІЯ

A free neutron (a subatomic particle without a charge) collides with an atom of uranium-235

U-235 is split into two particles of lighter elements (Krypton and Barium in this example, though there are variations)

The reaction also emits 2 or 3 neutrons (which will go on to collide with other atoms of uranium-235).

The products of fission, including the expended neutrons, weigh less than uranium-235. The difference in weight becomes energy—a lot of energy, according to the famous  $E = mc^2$ , where  $E$  = energy,  $m$  = missing mass,  $c$  = speed of light.

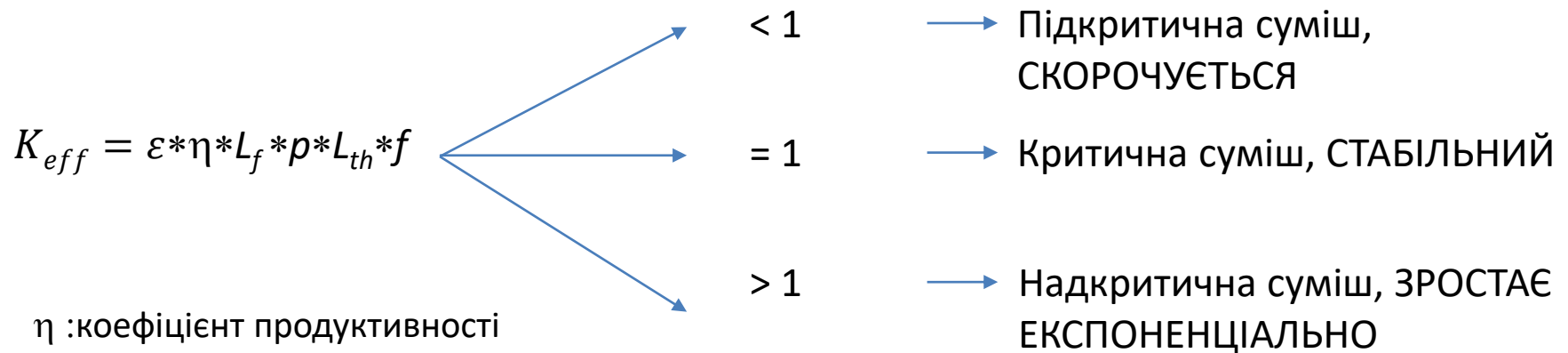
# CHAIN REACTION

A neutron splits atoms of U-235 into smaller atoms and heat energy... and free neutrons, which go on to react with other atoms.

# ПАЛИВО: СЕРЕДНІЙ НЕЙТРОННИЙ ЦИКЛ-ШЕСТИФАКТОРНА МОДЕЛЬ

## Ефективний коефіцієнт множення $K_{eff}$

$K_{eff}$ : число теплових нейтронів, повторно поглинених розщеплюваним матеріалом після середнього циклу



$\eta$  : коефіцієнт продуктивності

: коефіцієнт розмноження на швидких нейтронах

$L_f$  : витік швидких нейтронів

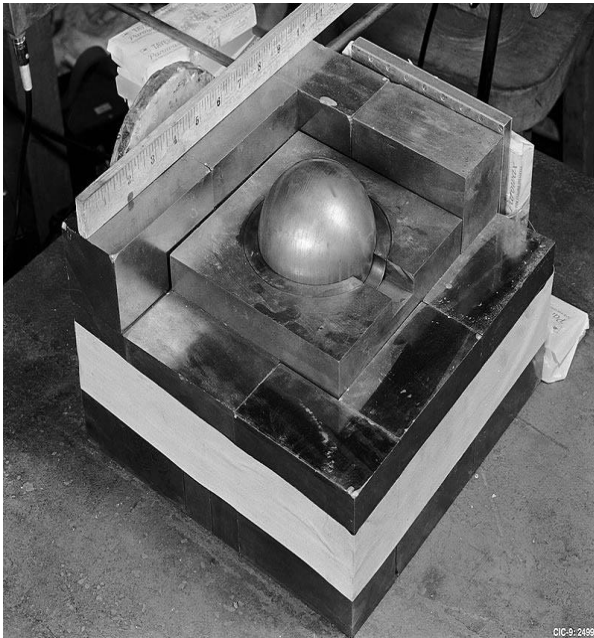
$\rho$  : резонансний вихід

$L_{th}$  : імовірність витоку теплових нейтронів

$F$  : коефіцієнт поглинення теплових нейтронів

# ПАЛИВО: КРИТИЧНА МАСА (1/3)

## Критична маса: маса, необхідна для самопідтримуваної ядерної реакції



*Експеримент з критичності  
(ЛАНЛ, 1945 р.):  
сфера з  $Pu$ , оточена відбивачем  
нейтронів (карбід вольфраму)*

Критична маса розщеплюваного матеріалу залежить від:

- **Ядерного матеріалу**: ядерних властивостей (імовірності поглинання нейтрону і розщеплення, яка характеризується перетином ядерного ділення), фізико-хімічних властивостей (густини, чистоти)
- **Геометрії** (форми)
- **Складу**: оточений відбивачем нейтронів, перерваний поглиначем.



# ПАЛИВО: КРИТИЧНА МАСА (2/3)

Ядерний матеріал	Нуклід	Критична маса
<b>Металевий уран сферичної форми</b> Високозбагачений збройний U Високозбагачений U Низькозбагачений U (Штучно виділений у лабораторії) U	>94% U-235 >50% U-235 <20% U-235 U-233	<50 – 55 кг <60 kg ± 10 кг >800 kg ±40 кг <10 – 15 кг
<b>Металевий плутоній сферичної форми</b> Pu вищого очищення альфа-фази Збройний Pu альфа-фази Збройний Pu дельта-фази	>97% Pu-239 >93% Pu-239 >93% Pu-239	<4 кг <8 -10 кг <10 - 15 кг

Природний уран: U-238 (>99,2%) + U-235 (<0,8%): **U-235 – єдиний розщеплюваний ізотоп**

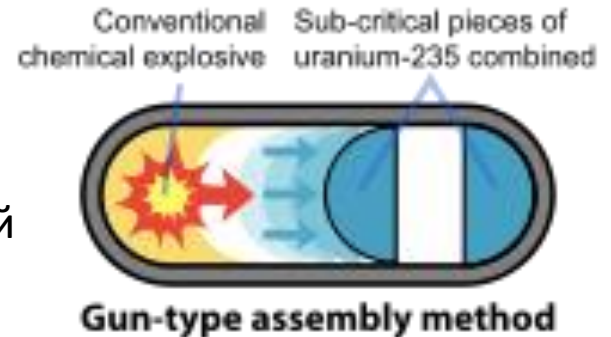
**Pu-239** виробляється штучним способом у ядерних реакторах, коли атом U-238 поглинає нейтрон, утворюючи U-239, який надалі розпадається до Pu-239 внаслідок швидкого двоетапного процесу. Надалі він може виділятися з урану на заводі з переробки ядерного палива.

# ПАЛИВО: КРИТИЧНА МАСА (3/3)

## Як її досягти у ядерній зброї

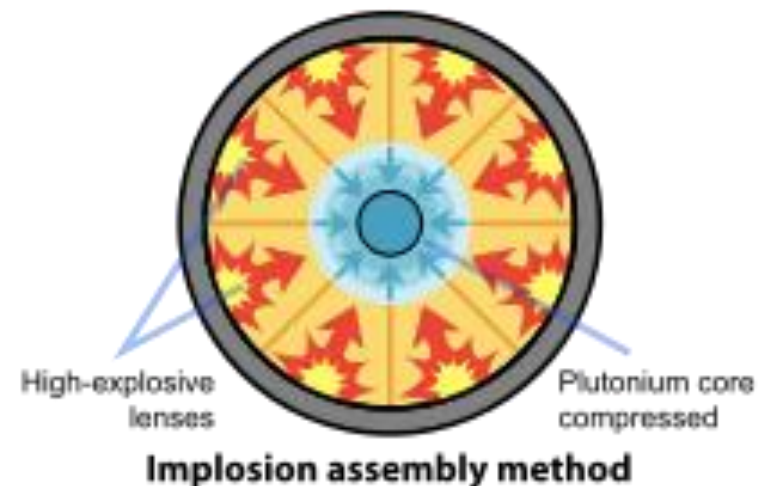
### 1. ЗАРЯД ГАРМАТНОГО ТИПУ:

Однією частиною підкритичної кількості матеріалу вистрілюють в іншу для створення надкритичної маси. Цей метод діє лише з ураном; плутоній занадто повільний для ефективної детонації



### 2. ІМПЛОЗИВНИЙ ЗАРЯД:

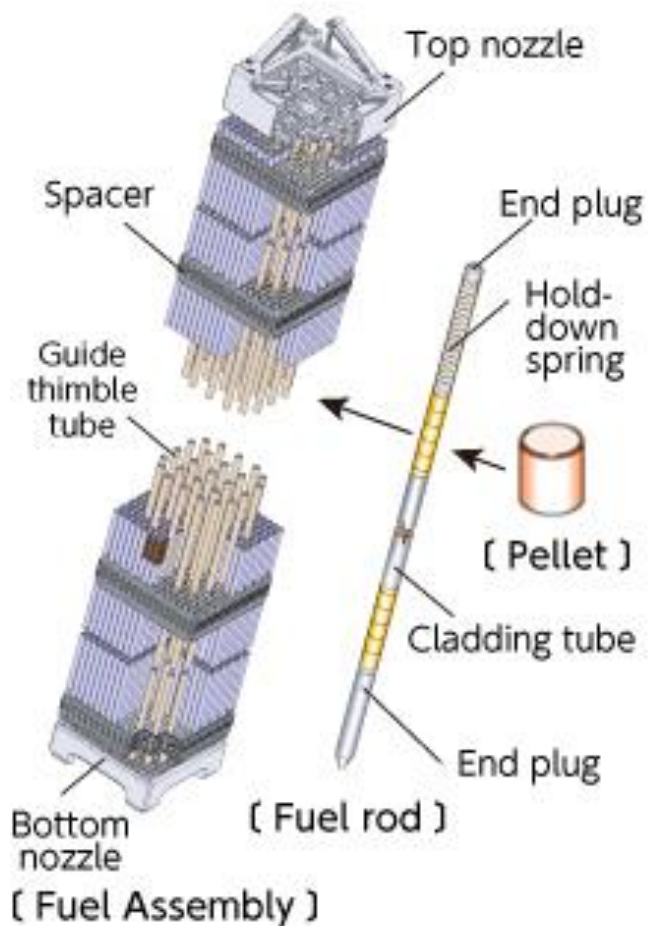
Критичність при детонації досягається за рахунок вибуху, направлено у середину. Плутонієвий сердечник стискається серією одночасних детонацій для збільшення його густини.



# ПРОБКИ

**Пробки:** використовуються у деяких промислових реакторах з графітовим сповільнювачем. У старих конструкціях використовувався **природний (0,72%  $^{235}\text{U}$ ) металевий уран** у алюмінієвій оболонці.

Новіші конструкції використовують **слабкозбагачений металевий уран (до 1,25%  $^{235}\text{U}$ )** у цирконієвій оболонці



# СТРИЖНІ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ

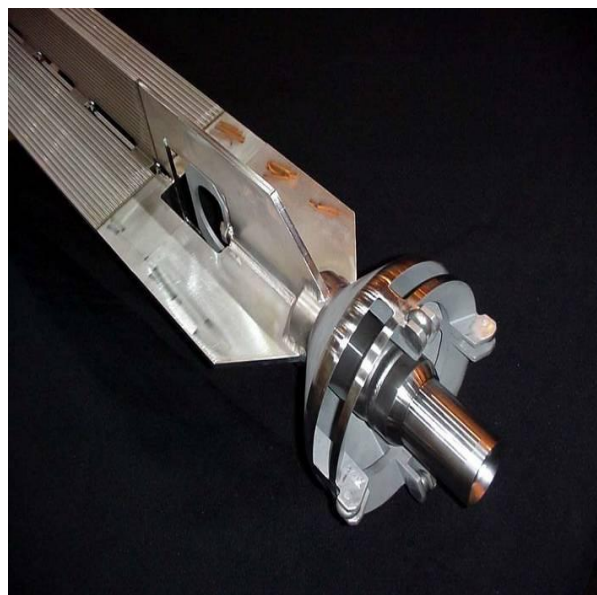
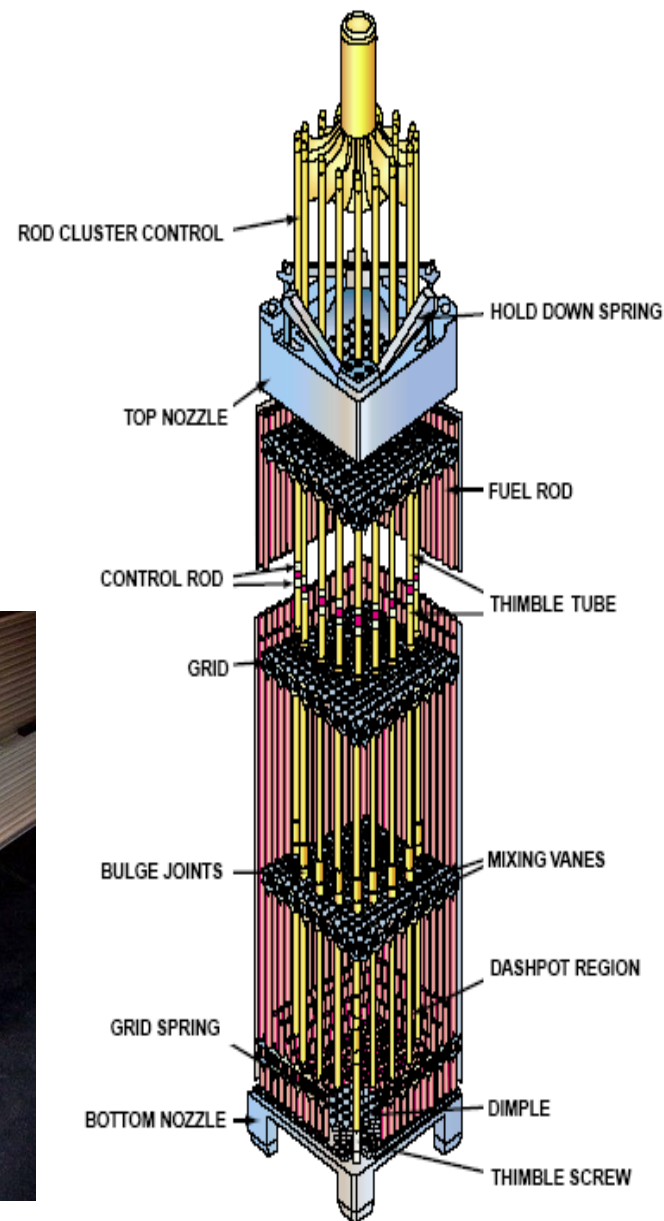
## •Ядерні застосування:

- Управління рівнем потужності реактора;
- Здатні поглинати велику кількість нейтронів без ділення

## •Інші застосування

- Відсутні

*Пристрій, який називається привідним двигуном СУЗ, вилучає СУЗ з активної зони для підвищення видачі потужності реактором, утримує СУЗ у фіксованому положенні для підтримання постійної потужності і вставляє СУЗ у активну зону для зменшення потужності.*



# СПОВІЛЬНЮВАЧ

Середовище, яке використовується для термалізації нейтронів (зменшує швидкість швидких нейтронів), називається **сповільнювачем**



Ефективний сповільнювач зменшує швидкість нейтронів за невелике число зіткнень, однак не поглинає їх у істотних обсягах, щоб вони могли викликати ділення.

Сповільнення нейтронів є доцільним, щоб зменшити витік нейтронів за межі активної зони і скоротити число резонансних поглинень непаливними матеріалами.



Сповільнюючий матеріал (сповільнювач) повинен мати такі ядерні характеристики:

- ❖ Великий перетин розсіювання
- ❖ Малий перетин поглинання
- ❖ Велику втрату енергії на кожне зіткнення

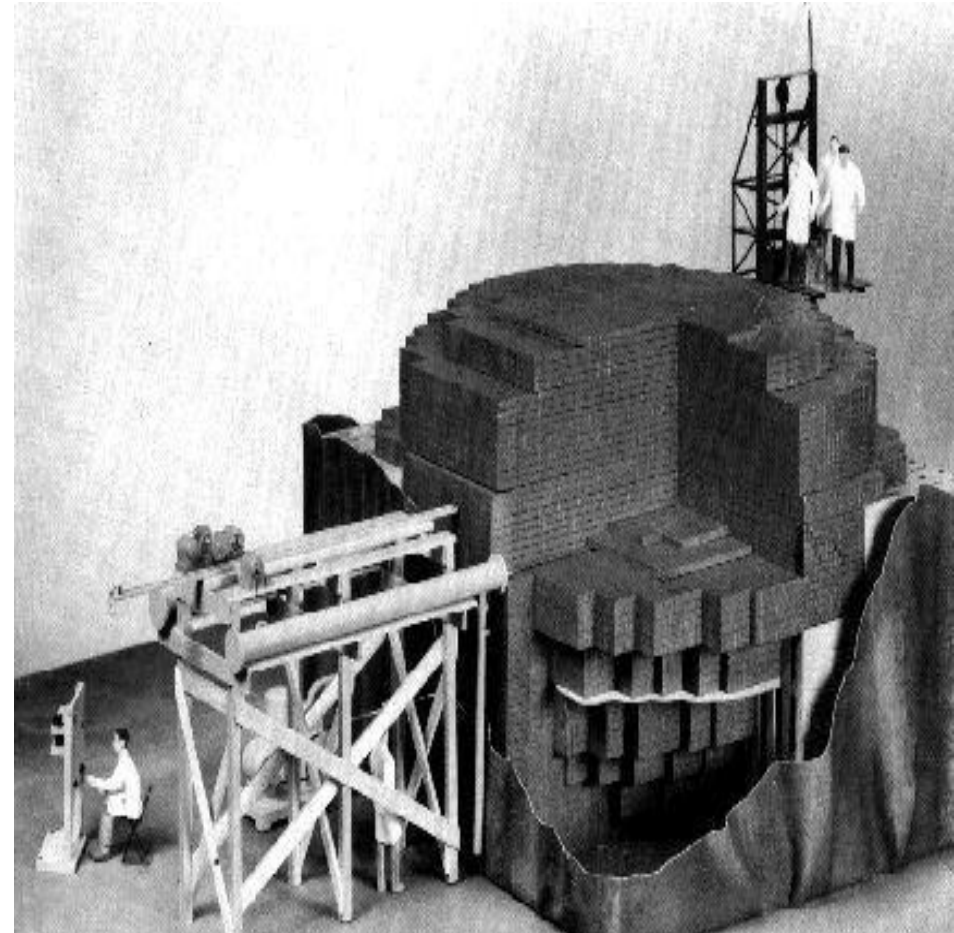
Поширені сповільнювачі включають у себе звичайну (легку) воду (близько 75% реакторів у світі), твердий графіт (20% реакторів) і важку воду (5% реакторів).

У деяких експериментальних реакторах також використовувався берилій; як варіант пропонувалися вуглеводні.

# ГРАФІТОВИЙ СПОВІЛЬНЮВАЧ

**Ядерний графіт** є формою вуглецю – зазвичай, у вигляді синтетичного графіту, – зі значною протидією корозії, низьким рівнем поглинення нейтронів, великою міцністю за високих температур, гарною стійкістю до абляції, який добре піддається обробці;

Спеціально виробляється для використання в якості сповільнювача або рефлектора у ядерному реакторі.



*Вид реактора CP-1 з графітовим сповільнювачем у розрізі*

# КОРПУС РЕАКТОРА

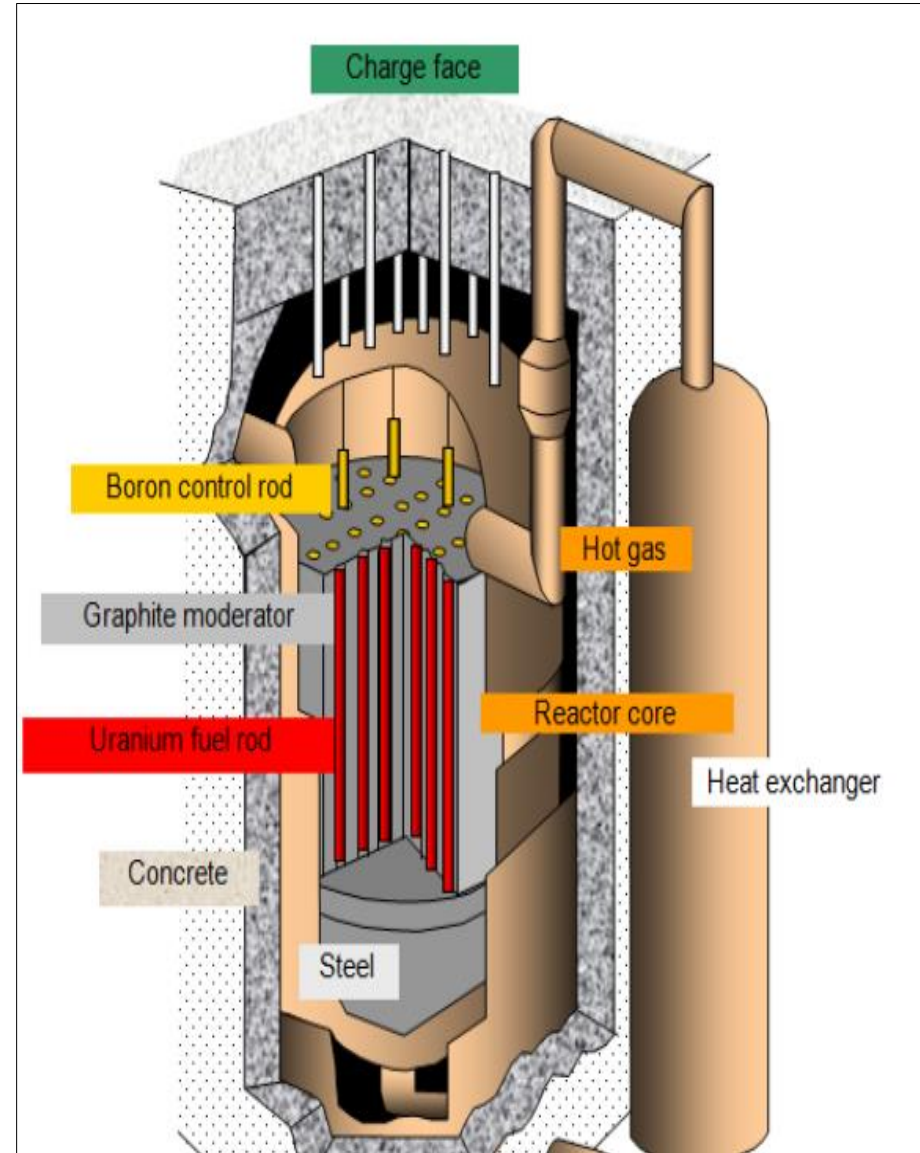
- **Ядерні застосування:**

Корпуси реактора використовуються для утримання ядерного палива у процесі його ділення.

- **Інші застосування:**

Відсутні

У більшості випадків активна зона реактора утримується всередині одного корпусу з високоміцної сталі або бетону, здатному витримувати інтенсивне випромінювання і утримувати теплоносій високого тиску, який циркулює у активній зоні реактора.



# ПРОЦЕС ЗБАГАЧЕННЯ

Збагачений уран – тип урану, у якому процентний вміст урану-235 збільшений внаслідок процесу **ізотопного розділення**.

У природному урані міститься 99,284% ізотопу  $^{238}\text{U}$  і лише 0,711% за масою ізотопу  $^{235}\text{U}$ .

$^{235}\text{U}$  – єдиний нуклід, що існує у природі, здатний до розщеплення під впливом теплових нейтронів.

Більшість ядерних реакторів вимагають збагаченого урану, тобто урану з підвищеними концентраціями U-235 – від 3,5% до 4,5%

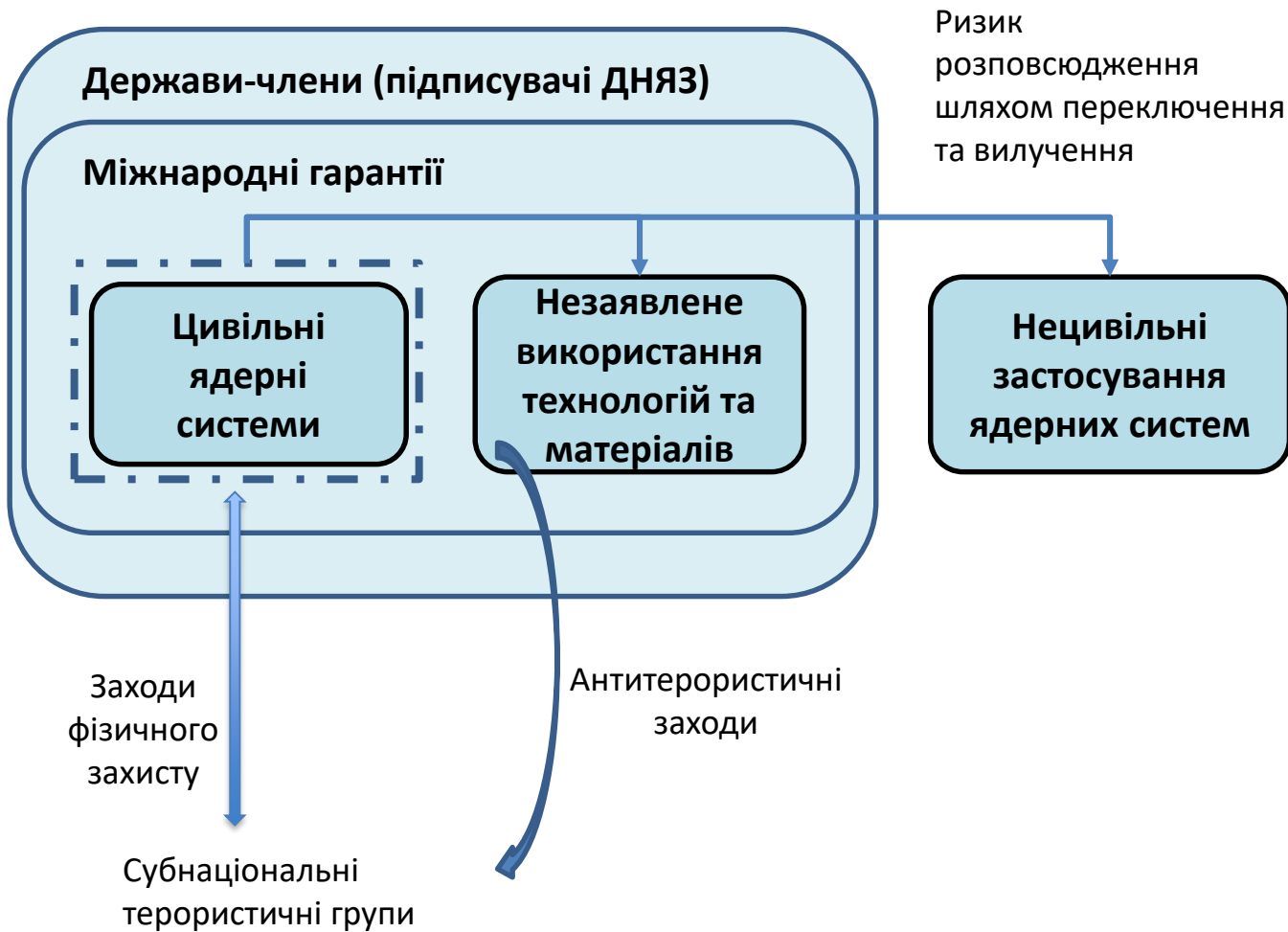
Ізотопне розділення є складним процесом, оскільки два ізотопи того самого елемента мають майже ідентичні хімічні властивості і **можуть бути розділені поступово завдяки різниці у масі.** ( $^{235}\text{U}$  лише на 1,26% легший за  $^{238}\text{U}$ .)

Процеси збагачення:

- 1) Газова дифузія
- 2) Центрифугування газів
- 3) Лазерний
- 4) Аеродинамічний
- 5) Електромагнітний



# ГАРАНТІЇ (1/3)



# ГАРАНТІЇ (2/3)

## Види установок

<u>Установки зі збагачення</u>	<u>Установки з конверсії та виробництва палива</u>	<u>Енергетичні реактори і сховища</u>	<u>Заводи з переробки ВЯП</u>
--------------------------------	--	---------------------------------------	-------------------------------

## Число установок під гарантіями (2013 р.)

19 установок	64 установки	403 реактори	13 установок
--------------	--------------	--------------	--------------

## Основні методи

Матеріал: UF <sub>6</sub>	Матеріали: оксиди U та Pu, MOX	Матеріали: опромінене паливо	Матеріали: нітрати U та Pu
Гамма-спектрометрія	Гамма-спектрометрія	Відеоспостереження та пломбування	Зважування
Зважування	Вимірювання нейтронів	Моніторинг витрати палива	Руйнівний аналіз
Руйнівний аналіз	Зважування	Виявлення черенковського випромінювання	Моніторинг витрати палива
Пломбування	Руйнівний аналіз	Виявлення гамма-випромінювання	Виявлення гамма-випромінювання
-	Відеоспостереження та пломбування	Виявлення нейтронів	Виявлення нейтронів

# ГАРАНТІЇ (3/3)

## МАГАТЕ

ЯМ	НЗУ	ВЗУ	Pu	Th	U-233
Знач. кільк.	75 кг	25 кг	8 кг	20 т	8 кг
Частота контролю	1 рік	1 місяць	1 місяць	1 рік	1 місяць

### Зауваження:

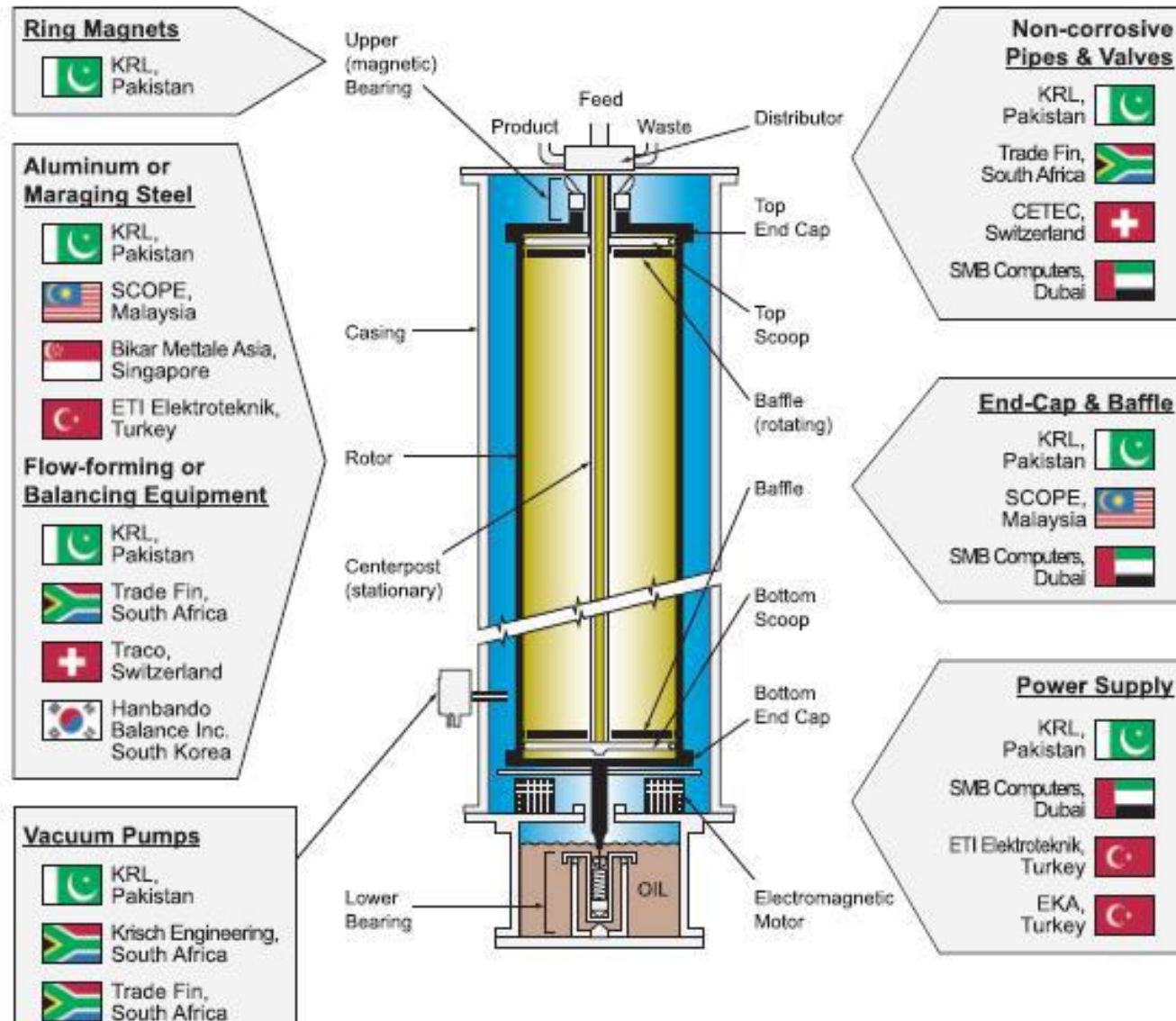
- Вид Pu не має значення
- Природний U в малих кількостях не контролюється :
  - 10 метричних тон природного U (0,71% U-235)
  - 20 метричних тон збідненого U (U-235 < 0,5%)
- Додатковий ядерний матеріал під гарантіями:  
 $H^3 > 1$  г (Kalinowski, 1995 p.)

## ЄВРАТОМ

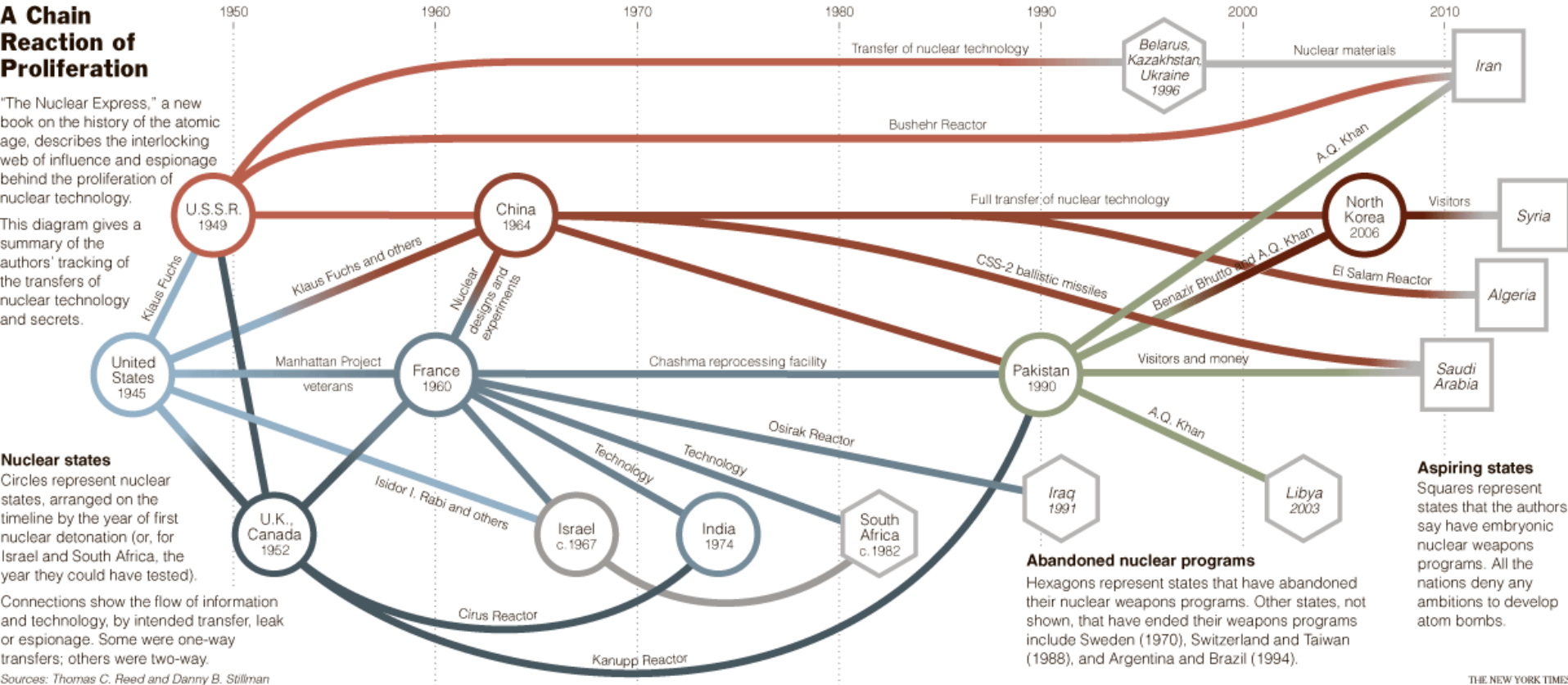
Цілі гарантій визначені подібним чином

# НЕСАНКЦІОНОВАНА ТОРГІВЛЯ

## Мережа закупівлі газових центрифуг для Лівії



# СХЕМА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ



# ОКРЕМІ ПРИКЛАДИ КРИМІНАЛЬНИХ СПРАВ

- **1984, Dutch businessman Van Anraat**
  - created front companies in Panama and Luxembourg, which he ran them from residences in Lugano, Milan and Singapore
  - Procured TMP, TDG controlled chemicals to Iraqi State Establishment for Oil Refineries and Gas Industry
  - In 2005 sentenced to 15 years for complicity in war crimes
- **German involved in procurement for Pakistan**
  - Declared filament winding machines as spare parts for water supply systems:
  - Declared boron as test kit for iron powder
  - Declared destination South Africa instead of Pakistan
  - Declared value 100 Euro: 3500 €!
  - 7 years 3 months imprisonment
- **H.W. Truppel**, exported aluminum tubes to DPRK: 4 years
- **Henk Slebos** for complicity with AQK & Pakistan: 18 months



**Дякую**

[Dualuse-armscontrol@angelominotti.com](mailto: Dualuse-armscontrol@angelominotti.com)

[info@angelominotti.com](mailto: info@angelominotti.com)

[www.angelominotti.com](http:// www.angelominotti.com)