

Energía Nuclear en Chile

Universidad Tecnológica Metropolitana

Abril - 2007

Rafael Correa Devés
Departamento de Física - UTEM

TEMAS

I. Energía en Chile

II. Energía Nuclear en el Mundo y Europa

III. Energía Nuclear en América Latina

IV. Principios Físicos Básicos de los Reactores Nucleares

V. Energía Nuclear en Chile. Razones para una Decisión

I. Energía Nuclear en Chile. Acciones y Desafíos Futuros

I. Energía en Chile

-Las $\frac{3}{4}$ partes de las fuentes de energía primaria a nivel mundial son de origen fósil, todas emisoras de CO₂. Las energías nucleoelectrica e hidroeléctrica, que no emiten estos gases, suman 12% y todas las demás renovables juntas sólo generan entre el 0.8 y 1.2%.

-Chile debe diversificar sus fuentes de energía sustentable. Nuestro país duplica su demanda cada 12 años lo cual se traduce en requerimientos de inversión de por lo menos 500 MW al año, y más aún a futuro.

-Se espera que a partir del año 2020, las necesidades anuales de energía sean de alrededor de 800MW. Para ese año, se estima que no quedarán grandes recursos hídricos disponibles.

-En la actualidad, la potencia instalada en el SIC es de 8.962 MW. Se estima que para el año 2020 dicha potencia instalada se duplique (alrededor de 16.600 MW), de los cuales alrededor de un 60% será hidroeléctrico y un 40% térmico.

SING – Sistema Interconectado Norte Grande.

SIC – Sistema Interconectado Central

SZA - Sistema Zona Austral (XI y XII Región)

Tabla A.1: Potencia bruta instalada en el SING. [Elec96]

Generadores	Potencia Instalada (MW)
Edelnor	230
Endesa	90
Tocopilla S.A.	638
Norgener	133
Mantos Blancos	28
TOTAL	1119

Tabla A.2: Centrales termoeléctricas del SIC. [Cede95]

Nombre	Potencia Inst. (MW)	Unids.	Propietario	Tipos de turbinas
Laguna Verde	54,7	2	Chilgener	Vapor-carbón
Renca	100,0	2	Chilgener	Vapor-carbón
Ventanas	338,0	2	Chilgener	Vapor-carbón
El Indio TG	18,8	1	Chilgener	Gas-diesel
D. de Almagro	23,8	1	Endesa	Gas-diesel
Huasco	16,0	2	Endesa	Vapor-carbón
Huasco	64,2	3	Endesa	Gas-IFO 180
Bocamina	125,0	1	Endesa	Vapor-carbón
Guacolda	150,0	1	Guacolda	Vapor-carbón
Laja	8,7	1	E. Verde S.A.	Vapor-des. Forest.
Constitución	8,7	1	E. Verde S.A.	Vapor-des. Forest.
TOTAL	907,9			

Tabla A.3: Centrales hidroeléctricas del SIC. [Cdec95]

Nombre	Potencia Inst. (MW)	Unids.	Propietario	Tipos de central
Alfalfal	160,0	2	Chilgener	Pasada
Maitenes	30,8	5	Chilgener	Pasada
Queltehues	41,0	3	Chilgener	Pasada
Volcán	13,0	1	Chilgener	Pasada
Colbún	400,0	2	Colbún	Embalse
Machicura	90,0	2	Colbún	Embalse
Pehuenche	500,0	2	Pehuenche	Embalse
Curillinque	85,0	1	Pehuenche	Pasada
Los Molles	16,0	2	Endesa	Pasada
Rapel	350,0	5	Endesa	Embalse
Sauzal	76,8	3	Endesa	Pasada
Sauzalito	9,5	1	Endesa	Pasada
Cipreses	101,4	3	Endesa	Embalse
Isla	68,0	2	Endesa	Pasada
Antuco	300,0	2	Endesa	Embalse
El Toro	400,0	4	Endesa	Embalse
Abanico	136,0	6	Endesa	Pasada
Canutillar	145,0	2	Endesa	Embalse
Pullinque	48,6	3	Pullinque	Pasada
Pilmaiquén	35,0	5	Pilmaiquén	Pasada
Florida	28,0	5	S.C. del Maipo	Pasada
Los Quilos	39,3	3	H.G. Vieja, M.V.	Pasada
Aconcagua	72,9	2	Aconcagua	Pasada
Capullo	10,7	1	E. E. Capullo	Pasada
Sauce Andes	1,2	4	Gen. S. Andes	Pasada
Carbomet	10,9	4	Carbomet	Pasada
TOTAL	3169,1			

**Antecedentes
sobre Ralco la
central
hidroeléctrica
más grande de
Chile.**

Características técnicas

NOMINALES

- ▶ **Número de unidades: 2**
- ▶ **Potencia: 570 MW**
- ▶ **Generación media anual: 3.100 GWH**
- ▶ **Factor de planta: 62%**
- ▶ **Caudal medio río BíoBío: 270 m³/seg**
- ▶ **Caudal de diseño: 368 m³/seg**
- ▶ **Caudal medio generado: 232 m³/seg**
- ▶ **Altura neta (para caudal de diseño):
175 metros**
- ▶ **Caudal ecológico: 27,1 m³/seg**

OBRAS DE EMBALSE

Embalse

- ▶ **Nivel máximo normal de operación:**
725 m s.n.m.

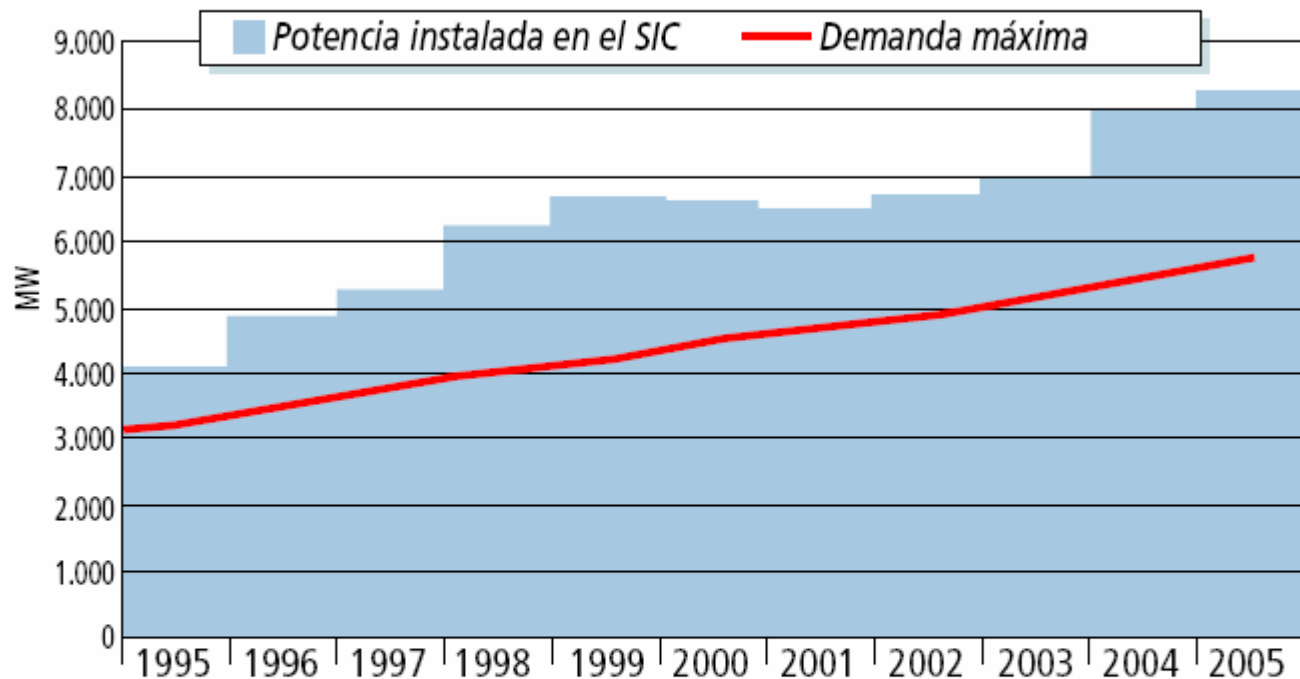
- ▶ **Nivel mínimo normal de operación:**
705 m s.n.m.

- ▶ **Nivel mínimo eventual de
operación:** 692 m s.n.m.

- ▶ **Superficie máxima inundada:**
3.467 hectáreas

- ▶ **Volumen total embalsado:** 1.200
millones de m³

Potencia instalada y demanda máxima del SIC



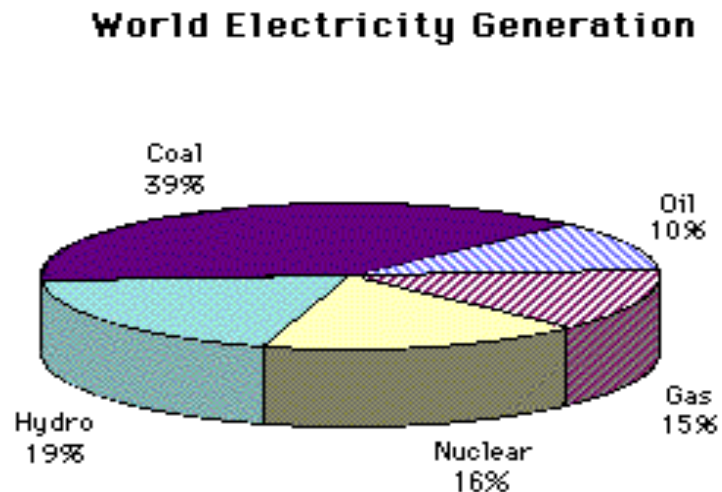
	2004	2005
Planta Valdivia	70	-
El Indio	18	-
Nehuenco II TV	131	-
Ralco	670	-
Coronel	48	-

	2004	2005
Antilhue	50	-
Horcones	25	-
Candelaria	-	250
Total	1.012	250

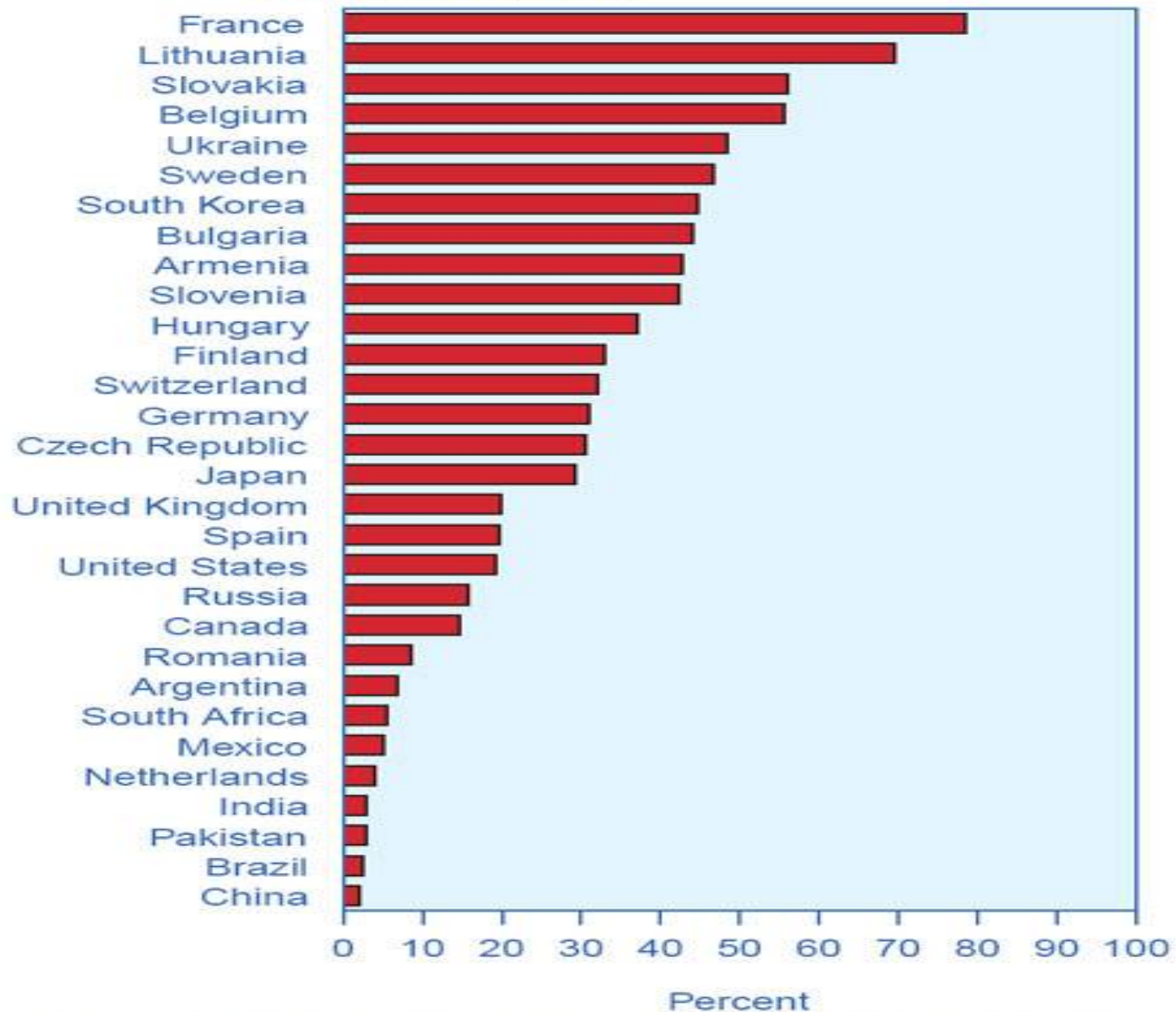
Fuente: CDEC-SIC.

II. Energía Nuclear en el Mundo y Europa

- En el mundo hay 429 reactores nucleares en operación y 24 en construcción.
- Estados Unidos posee 109 de dichos reactores, Francia tiene 59, Japón 56 y España 8.
- En la Unión Europea el 38% de la energía eléctrica producida es nuclear, (en Francia es el 79%, en Bélgica el 55%, en Suecia el 47%, en Alemania el 31% y en España el 19%).



Nuclear Shares of National Electricity Generation, 2005



Source: International Atomic Energy Agency, Reference Data Series 2, "Power Reactor Information System," web site www.iaea.org/programmes/a2/ (April 2006).

Summary of Nuclear Power Reactors

	Nuclear generation 2005		OPERABLE at Sept 2006		CONSTRUCTION at Sept 2006		PLANNED at Sept 2006		PROPOSED at Sept 2006	
	TWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe
Argentina	6.4	6.9	2	935	1	692	0	0	1	1000
Armenia	2.5	43	1	376	0	0	0	0	1	1000
Belgium	45.3	56	7	5728	0	0	0	0		
Brazil	9.9	2.5	2	1901	0	0	1	1245		
Bulgaria	17.3	44	4	2722	0	0	2	1900		
Canada*	86.8	15	18	12595	2	1540	2	2000		
Chinese										
mainland	50.3	2	10	7587	5	4170	13	12920	50	35880
Taiwan	38.4	20	6	4884	2	2600	0	0		
Czech Rep.	23.3	31	6	3472	0	0	0	0	2	1900
Egypt	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600
Finland	22.3	33	4	2696	1	1600	0	0		
France	430.9	79	59	63473	0	0	1	1630		
Germany	154.6	31	17	20303	0	0	0	0		
Hungary	13	37	4	1773	0	0	0	0		
India	15.7	2.8	16	3577	7	3088	4	2800	20	10360
Indonesia	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4000
Iran	0	0	0	0	1	915	2	1900	3	2850
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200
Japan	280.7	29	55	47700	2	2285	11	14945	1	1100
Kazakhstan	0	0	0	0					1	300
Korea DPR (N)	0	0	0	0	0	0	1	950		
Korea RO (S)	139.3	45	20	17533	1	950	7	8250		
Lithuania	10.3	70	1	1185	0	0	0	0	1	1000
Mexico	10.8	5	2	1310	0	0	0	0	2	2000
Netherlands	3.8	3.9	1	452	0	0	0	0		
Pakistan	2.4	2.8	2	400	1	300	2	600	2	1200
Romania	5.1	8.6	1	655	1	655	0	0	3	1995
Russia	137.3	16	31	21743	5	4550	2	1850	8	9375
Slovakia	16.3	56	6	2472	0	0	0	0	2	840
Slovenia	5.6	42	1	676	0	0	0	0		
South Africa	12.2	5.5	2	1842	0	0	1	165	24	4000
Spain	54.7	20	8	7442	0	0	0	0		
Sweden	69.5	45	10	8975	0	0	0	0		
Switzerland	22.1	32	5	3220	0	0	0	0		
Turkey	0	0	0	0	0	0	3	4500		
Ukraine	83.3	49	15	13168	0	0	2	1900		
UK	75.2	20	23	11852	0	0	0	0		
USA	780.5	19	103	98054	1	1065	2	2716	21	24000
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000
WORLD	2,626	16	442	370,701	30	24,410	56	60,271	150	106,600

Source: Reactor data: WNA to 12/9/06

Cuadro 1: situación de la energía nuclear en el mundo en 2004

Países	Reactores nucleares ¹⁰				Electricidad Proporción en la generación de electricidad ¹²
	Funcionan	Edad media	En construcción	Previstos ¹¹	
Argentina	2	26	1	1	9 %
Armenia	1	24	0	0	36 %
Bélgica	7	24	0	0	56 %
Brasil	2	13	0	1	4 %
Bulgaria	4	19	0	0	38 %
Canadá ¹⁴	17	20	0	2	13 %
China	10	4	1	4	2 %
República Checa	6	13	0	0	31 %
Finlandia ¹⁵	4	25	1	0	27 %
Francia ¹⁶	59	20	0	1	78 %
Alemania	18	23	0	0	28 %
Hungría	4	19	0	0	33 %
India	14	17	8	0	3 %
Irán	0	0	2	1	0 %
Japón	54	20	2	12	25 %
República Popular Democrática de Corea (del Norte) ¹⁷	0	0	1	1	0 %
República de Corea (del Sur)	19	12	1	8	40 %
Lituania	2	19	0	0	80 %
México	2	13	0	0	5 %
Países Bajos	1	31	0	0	5 %
Pakistán	2	19	0	1	2 %
Rumanía	1	8	1	0	9 %
Rusia	30	23	3	0	17 %
Eslovaquia	6	17	0	0	57 %
Eslovenia	1	23	0	0	40 %
Sudáfrica	2	20	0	0	6 %
España	9	23	0	0	24 %
Suecia	11	26	0	0	50 %
Suiza	5	29	0	0	40 %
Taiwán	6	23	2	0	22 %
Ucrania	14	17	3	0	46 %
Reino Unido	23	26	0	0	24 %
Estados Unidos	104	25	0	0	20 %
UE25	151	22	1	1	31 %
Total	440	21	26	32	16 %

En estos momentos hay nueve países en el mundo que mantienen una producción de uranio enriquecido para fines civiles:

China,

Japón,

Brasil,

Alemania,

Holanda,

Francia,

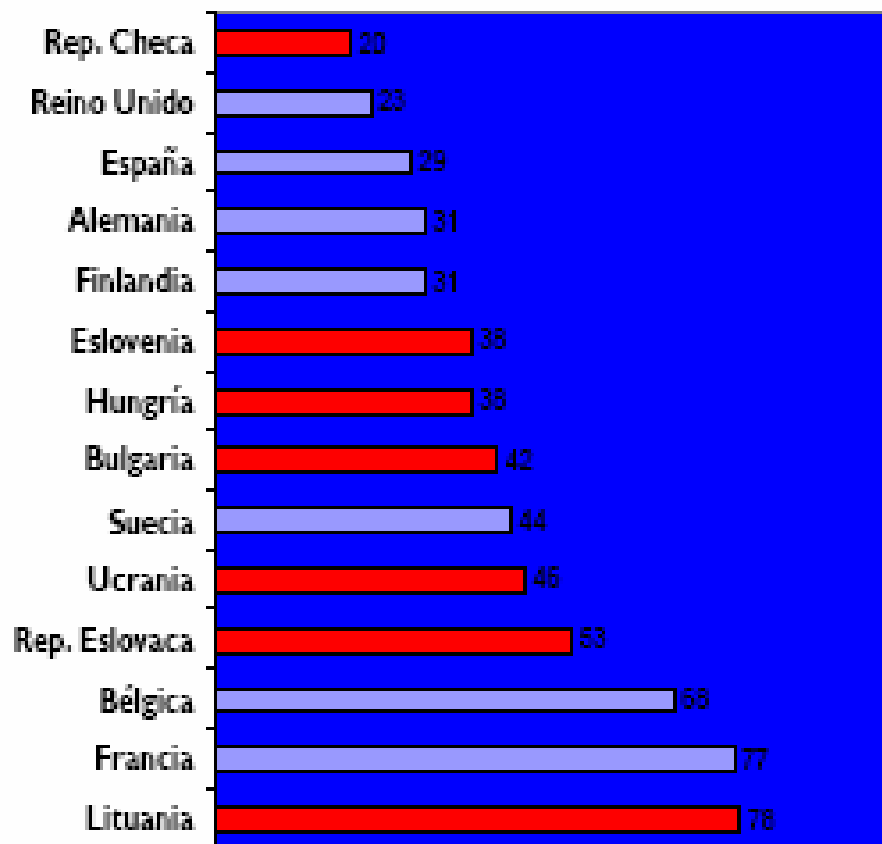
Reino Unido,

Rusia

Estados Unidos.

Centrales nucleares en Europa

% de energía nuclear
sobre Producción Total



Fuente: Agencia Internacional Energía Atómica

Miembros de la U.E.

	Reactores
Países Bajos	1
Finlandia	4
Bélgica	7
España	9
Suecia	11
Alemania	19
Reino Unido	33
Francia	59
TOTAL	143

Países candidatos U.E.

	Reactores
Rumania	1
Eslovenia	1
Lituania	2
Hungría	4
Rep. Checa	5
Bulgaria	6
Rep. Eslovaca	6
TOTAL	25

Otros países europeos

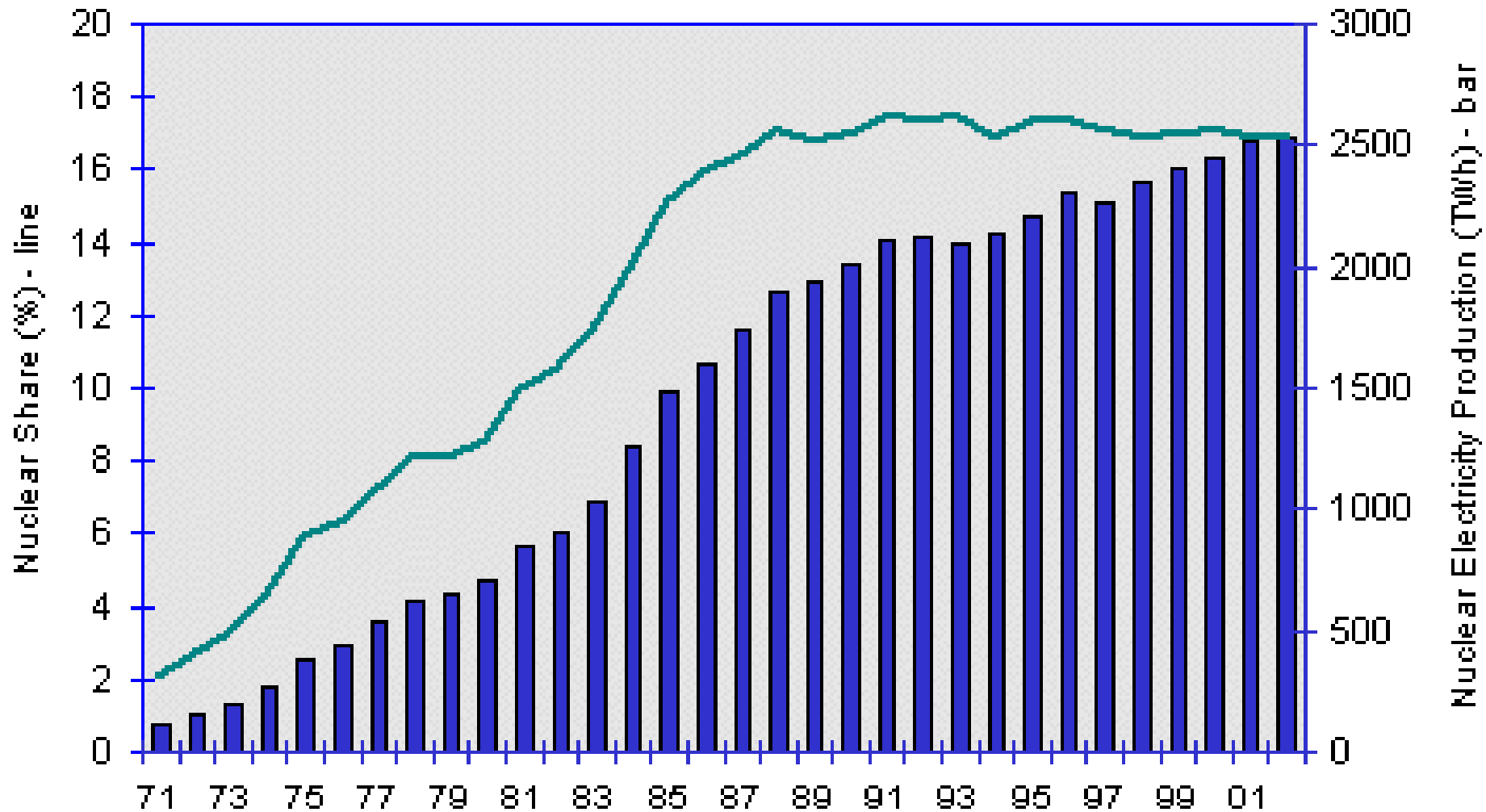
	Reactores
Suiza	5
Ucrania	13
Rusia	30
TOTAL	48

Centrales nucleares en U. E.

143 reactores nucleares

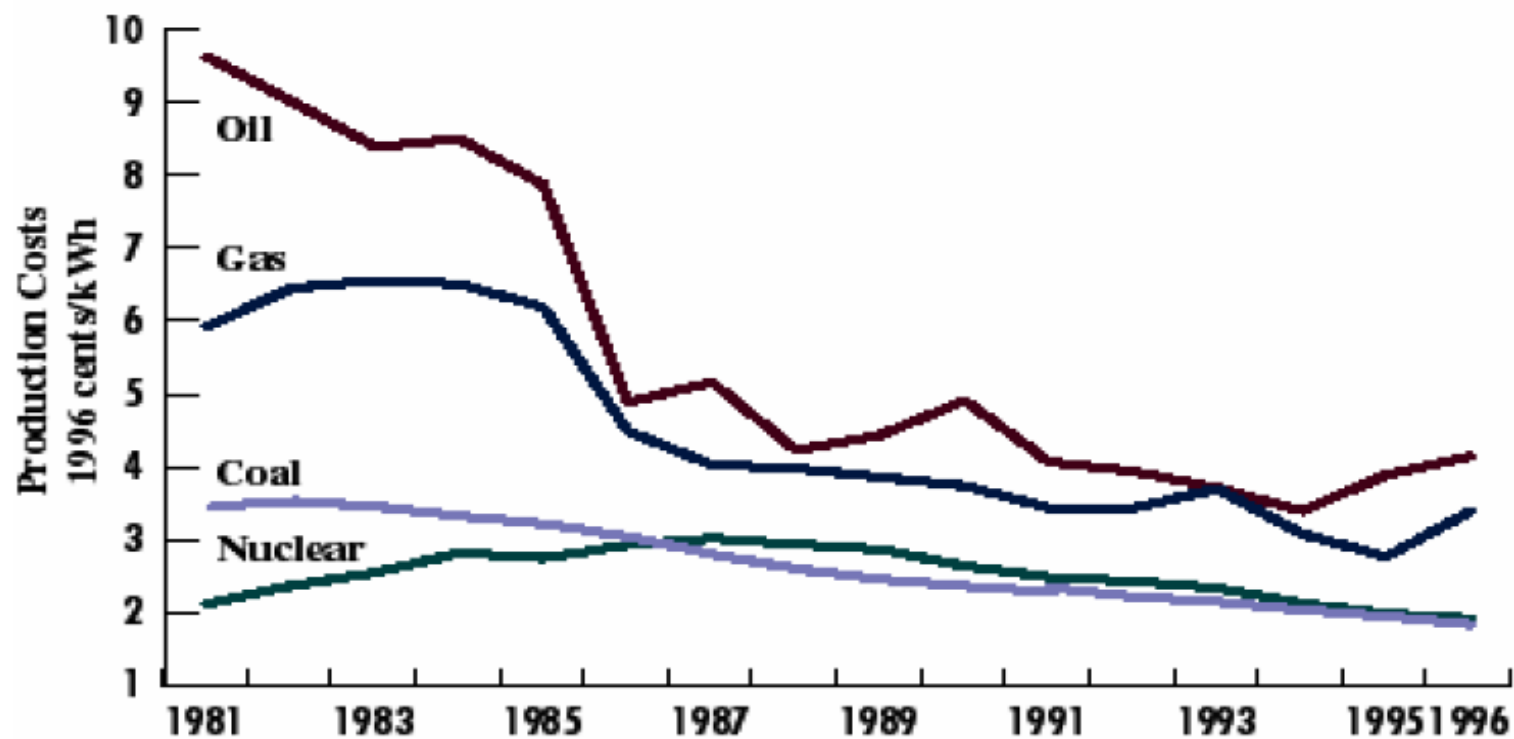
- Las centrales nucleares producen el 35% de la electricidad que se consume en Europa, variando del 4% (Holanda) al 79% (Francia)
- Vida media centrales: 22,3 años
- La demanda de electricidad aumenta un 4% anual (en España a un 6%)

Nuclear Electricity Production and Share of Total Electricity Production



Electricity Production Costs

(1996 dollars)



U.S. Electricity Production Costs

1995-2005 (Averages in 2005 cents per kilowatt-hour)

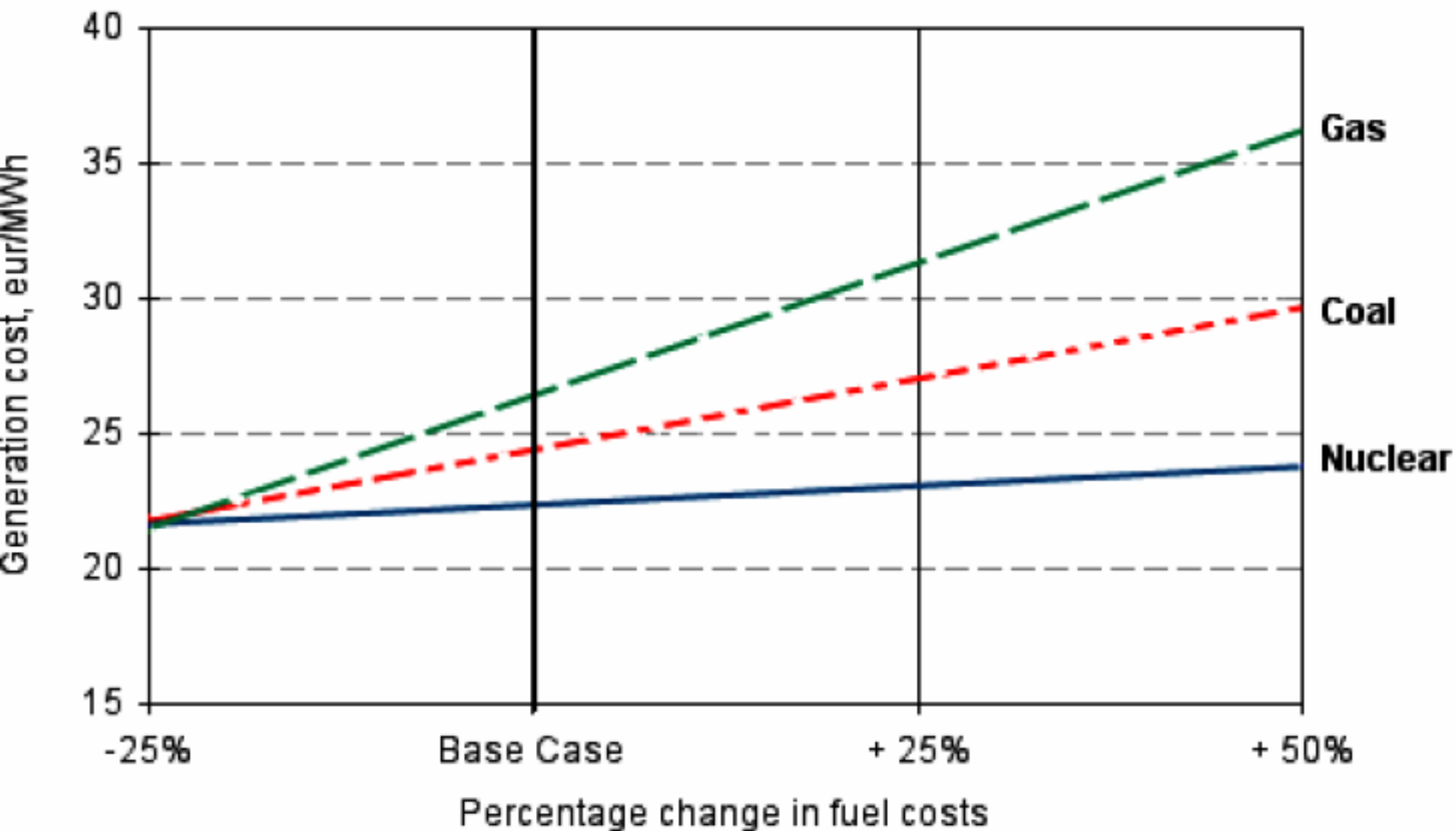


Production Costs = Operations and Maintenance Costs + Fuel Costs

Source: Global Energy Decisions
Updated: 6/06



**The impact of fuel costs on electricity generation costs.
Finland, early 2000**



Some comparative electricity generating cost projections for year 2010 on - 5% discount rate

	nuclear	coal	gas
Finland	2.76	3.64	-
France	2.54	3.33	3.92
Germany	2.86	3.52	4.90
Switzerland	2.88	-	4.36
Netherlands	3.58	-	6.04
Czech Rep	2.30	2.94	4.97
Slovakia	3.13	4.78	5.59
Romania	3.06	4.55	-
Japan	4.80	4.95	5.21
Korea	2.34	2.16	4.65
USA	3.01	2.71	4.67
Canada	2.60	3.11	4.00

Some comparative electricity generating cost projections for year 2010 on - 10% discount rate

	nuclear	coal	gas
Finland	4.22	4.45	-
France	3.93	4.42	4.30
Germany	4.21	4.09	5.00
Switzerland	4.38	-	4.65
Netherlands	5.32	-	6.26
Czech Rep	3.17	3.71	5.46
Slovakia	4.55	5.52	5.83
Romania	4.93	5.15	-
Japan	6.86	6.91	6.38
Korea	3.38	2.71	4.94
USA	4.65	3.65	4.90
Canada	3.71	4.12	4.36

US 2003 cents/kWh, Discount rate 10%, 40 year lifetime, 85% load factor.

Source: OECD/IEA NEA 2005.

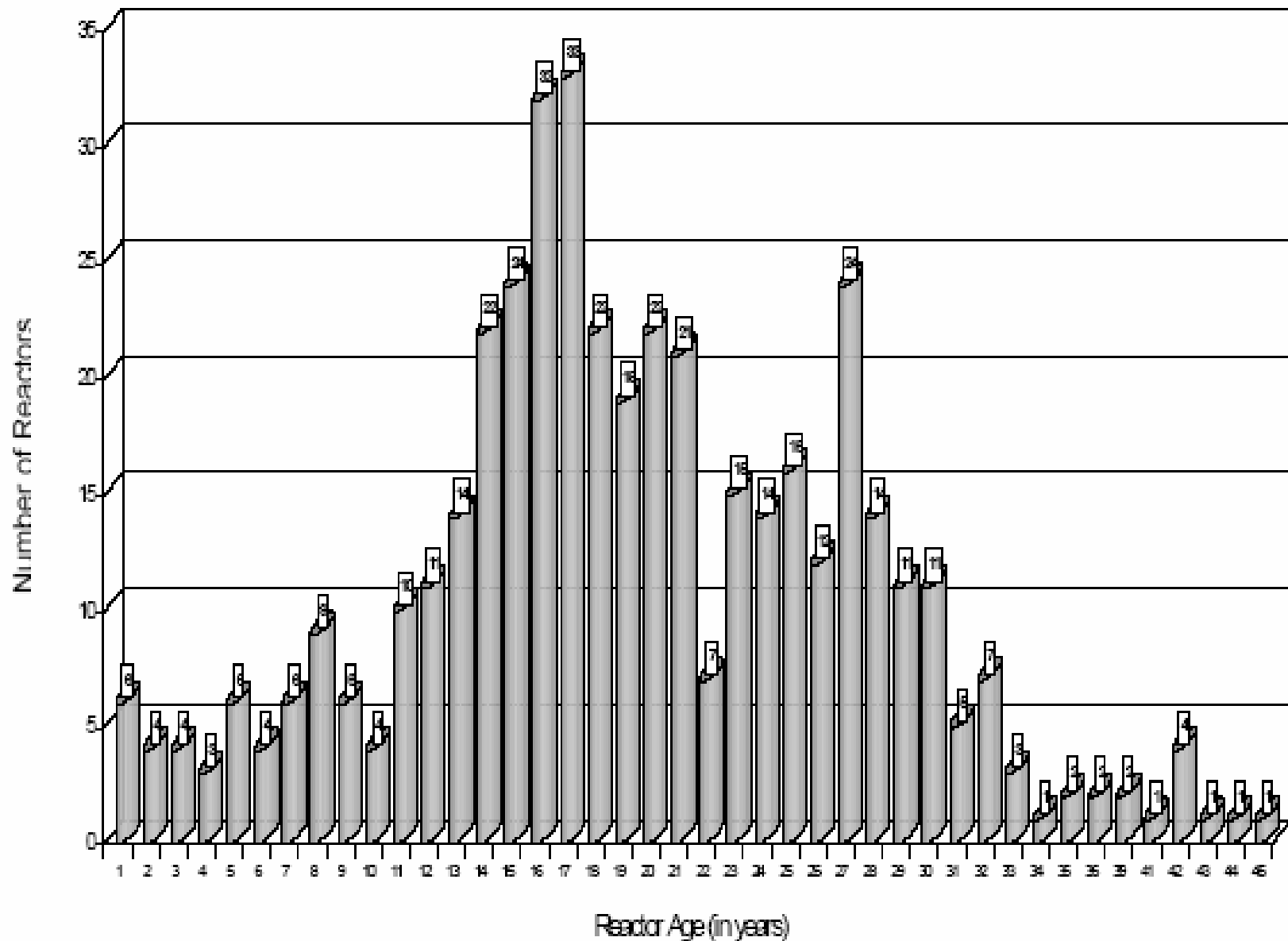


FIG. 1. Distribution of operating reactor units by age — as of 31 December 2001.

Table 3. Distribution of the net electrical power by reactor type and age group as of the end of 2001 [7]

[GWe]

	PWR	BWR	WWER	LWGR	PHWR	AGR	GCR	FBR	Others	Total
41< Reactor age < 45 years							0.40			0.40
36< Reactor age < 40 years							1.12			1.12
31< Reactor age < 35 years	3.99	4.93					0.92			9.85
26< Reactor age < 30 years	24.99	15.62	2.41	1.88	0.55	1.21	0.49	0.23		47.37
21< Reactor age < 25 years	37.73	15.38	3.91	3.71	0.19	1.21		0.56	0.148	62.83
16< Reactor age < 20 years	64.81	24.71	10.67	4.89	7.23	0.55		0.25		113.10
11< Reactor age <15 years	41.84	11.24	10.36	2.11	1.87	5.42				72.84
Reactor age 0 - 10 years	25.01	6.01	5.49	0.00	6.66	0.00			2.63	45.80
TOTAL	198.36	77.88	32.83	12.59	16.50	8.38	2.93	1.04	2.78	353.298

III. Energía nuclear en América Latina

-3,% de la energía eléctrica de América Latina proviene de fuentes nucleares, pero si prosperan los planes de expansión de Argentina, Brasil y México, esa proporción podría más que duplicarse.

-**Brasil** se propone instalar su tercer reactor, mientras Argentina y México pasarán de dos a cuatro.

-**Gobierno Argentino** presenta ahora un plan por el que pretenden aumentar la producción de energía nuclear del 9% del total de la energía que consume el país, al 16%.

-Con este objeto a más tardar en 2010, la central Atucha II estará en funcionamiento y se destinará una inversión de 1.800 millones de dólares.

-Con vistas a una cuarta central se prevé aumentar la inversión total hasta los 3.500 millones de dólares (2.733 millones de euros) y sumar así 1.600 megavatios al sistema (ahora, por la red energética nacional circulan 23.000 megavatios).

Atucha II - Argentina

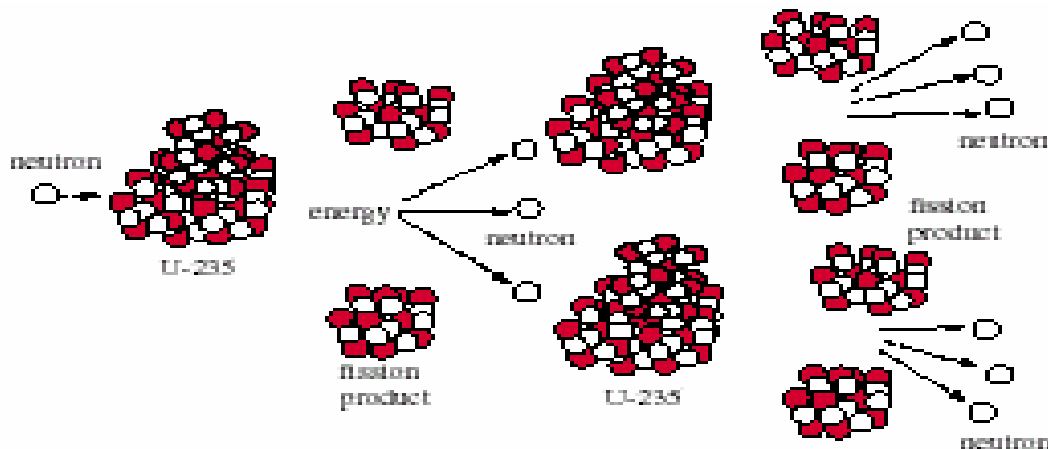


IV. Principios Físicos Básicos de los Reactores Nucleares

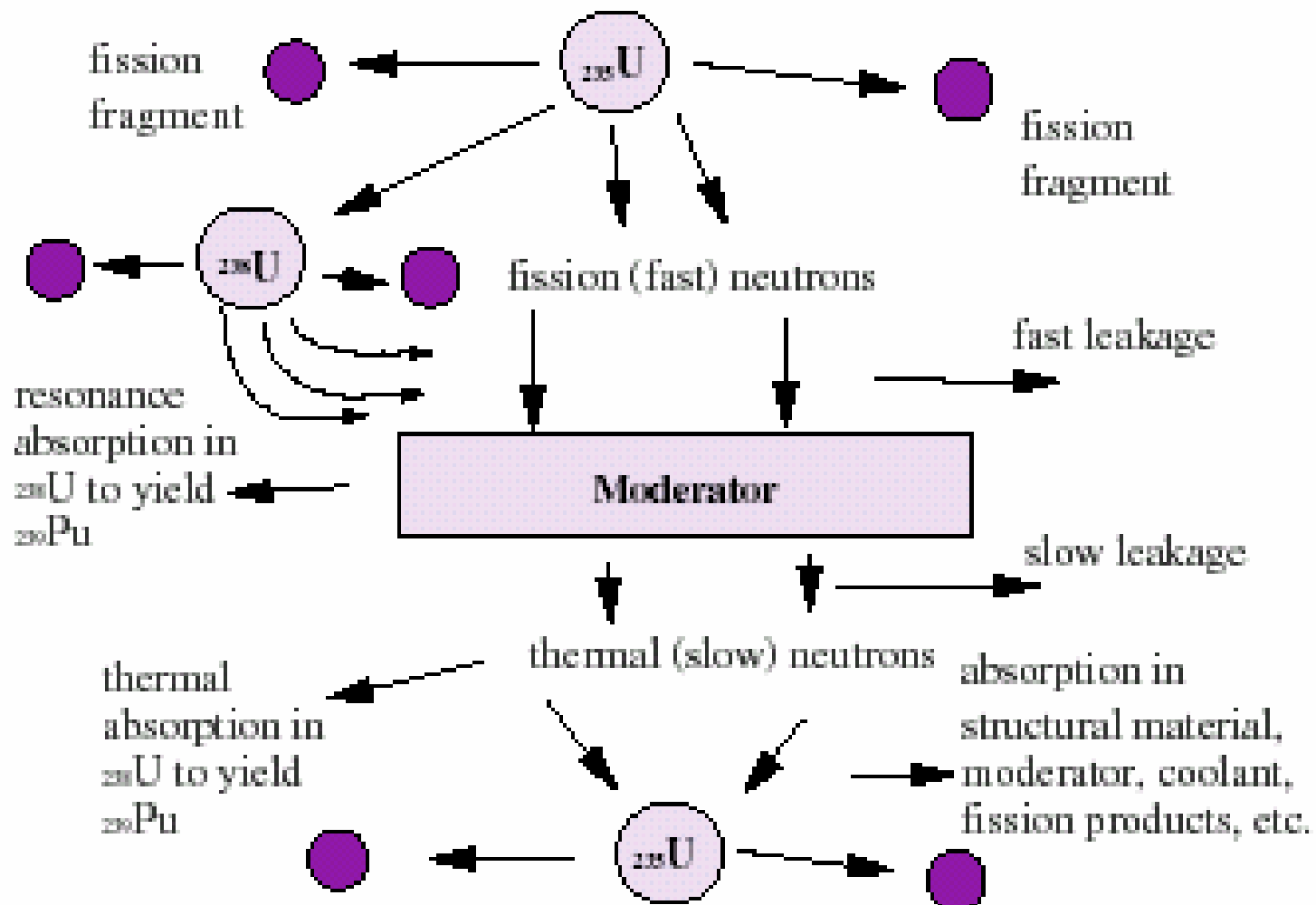
-Desde la década del 40 se desarrolla una profusa investigación sobre los usos de la energía nuclear.

-Principio de equivalencia de masa – energía está en la base de todo reactor:
 $E = mc^2$. Proceso típicos en el núcleo del reactor son:

- dispersión elástica
- captura de neutrón
- fisión



Ciclo Neutrónico

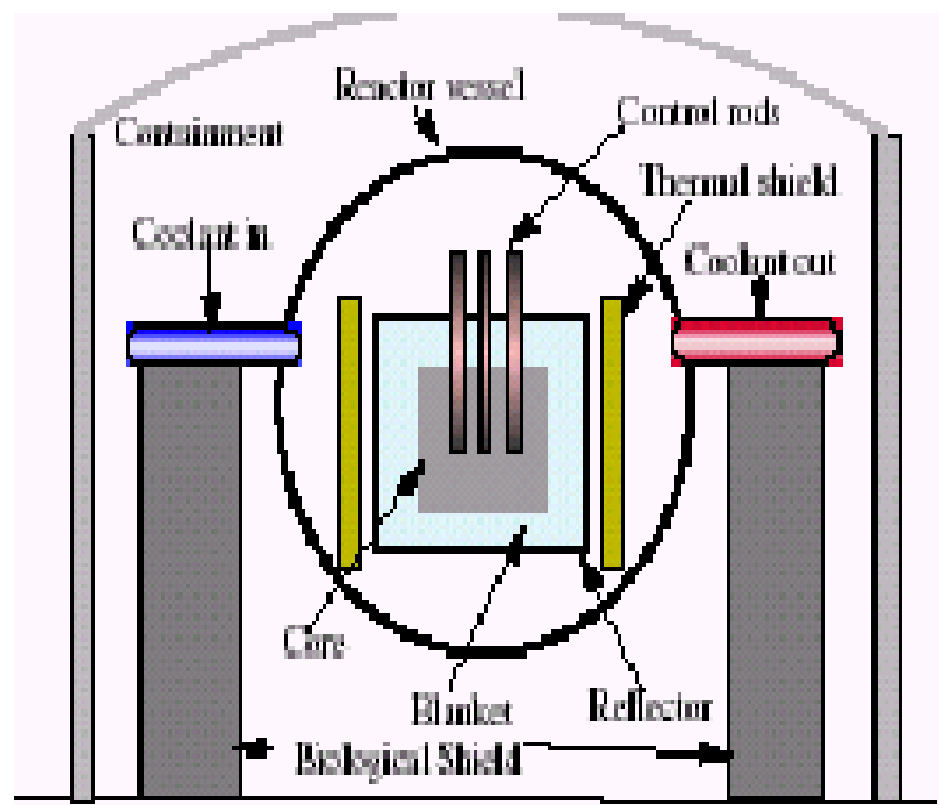
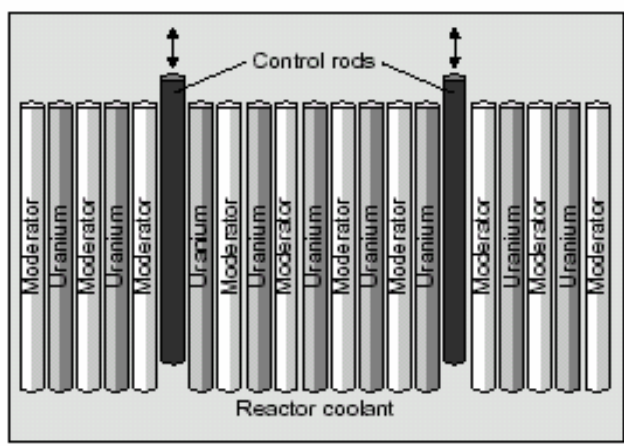


Los elementos centrales y comunes a la mayoría de los reactores son:

- Combustible y barras de combustible
- Núcleo del reactor
- Barras de control
- Moderador
- Material refrigerante
- Blindaje.

Tipos de Reactores:

Reactores de Investigación
Reactores de Potencia (BWR, PWR)



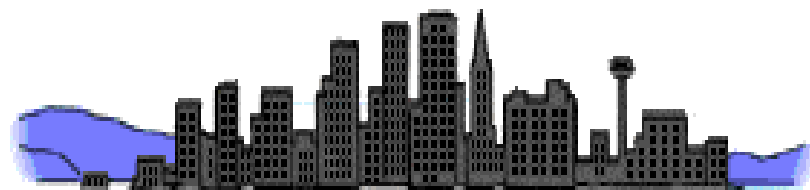
Los reactores más empleados en las centrales nucleoelectricas son:

- Reactor de agua a presión (PWR)**, que emplea agua ligera como moderador y refrigerante; óxido de uranio enriquecido como combustible. El refrigerante circula a una presión tal que el agua no alcanza la ebullición, y extrae el calor del reactor, que después lleva a un intercambiador de calor, donde se genera el vapor que alimenta a la turbina.
- Reactor de agua en ebullición (BWR)**, que emplea elementos similares al anterior, pero ahora el refrigerante, al trabajar a menor presión, alcanza la temperatura de ebullición al pasar por el núcleo del reactor, y parte del líquido se transforma en vapor, el cual una vez separado de aquél y reducido su contenido de humedad, se conduce hacia la turbina sin necesidad de emplear el generador de vapor.
- Reactor de agua pesada (HWR)**, que emplea agua pesada como moderador. Existen versiones en las que el refrigerante es agua pesada a presión, o agua pesada en ebullición. Puede emplear uranio natural o ligeramente enriquecido como combustible.

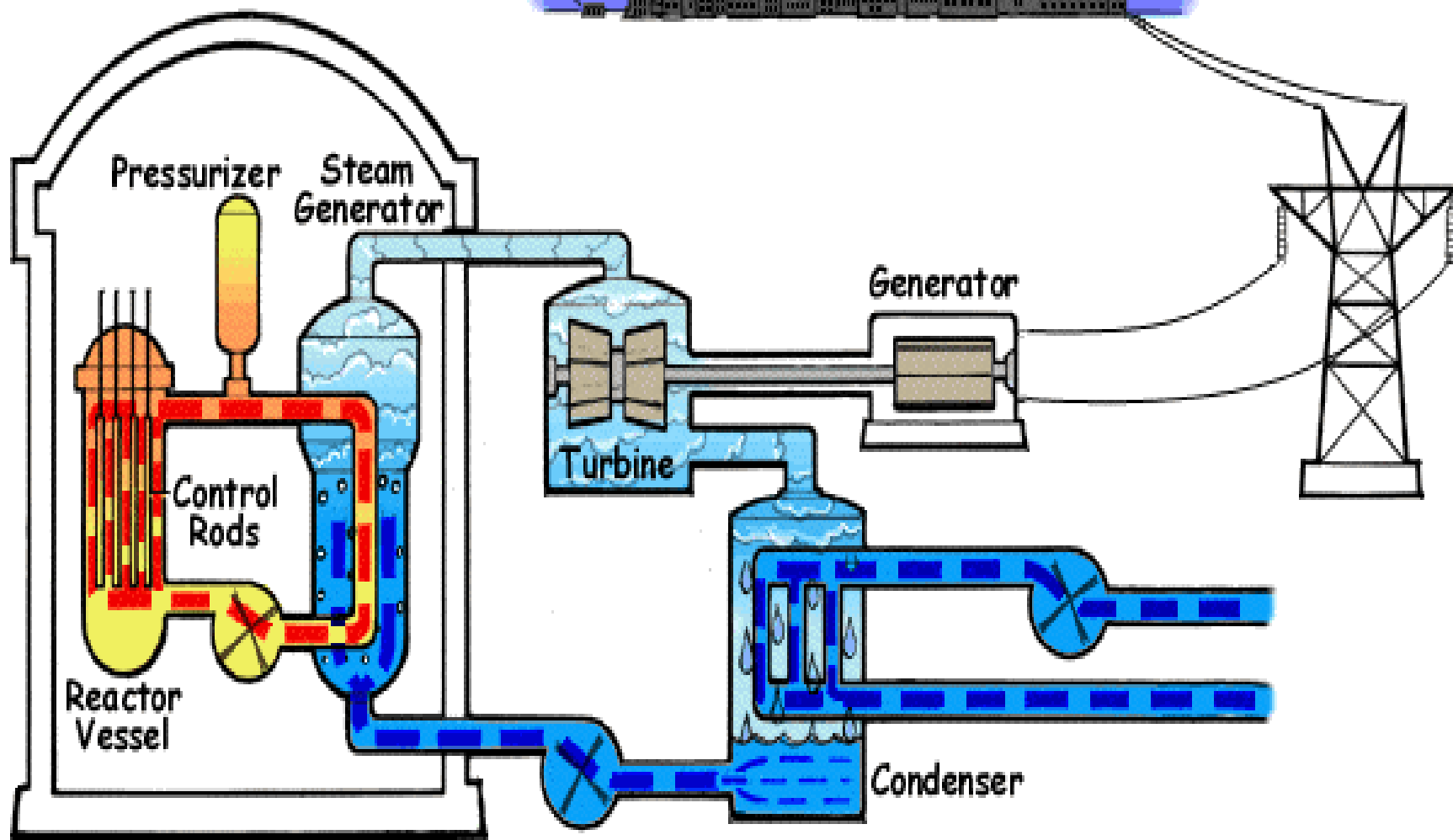
-Reactor de grafito-gas. Este tipo de reactores usan grafito como moderador y CO₂ como refrigerante. Mientras que los primeros reactores de este tipo emplearon uranio natural en forma metálica, los actuales denominados avanzados de gas (AGR) utilizan óxido de uranio enriquecido; y los denominados reactores de alta temperatura (HTGR), usan helio como refrigerante.

- Reactor de agua en ebullición (RBMK), moderado por grafito, desarrollado en la Unión Soviética, que consiste en un reactor moderado por grafito, con uranio enriquecido, y refrigerado por agua en ebullición. Este tipo de reactores no se han empleado en Europa occidental.

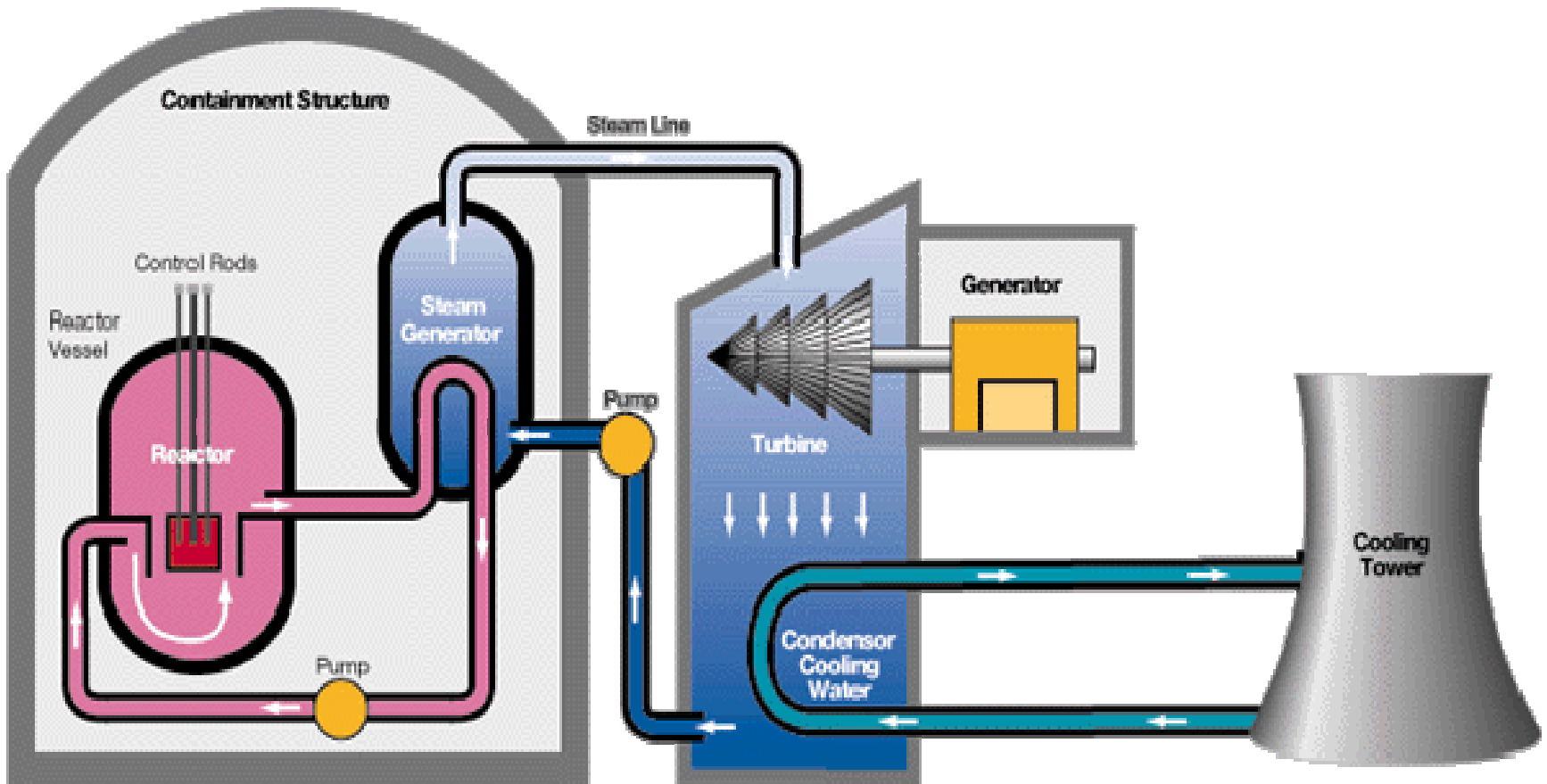
The Pressurized Water Reactor (PWR)



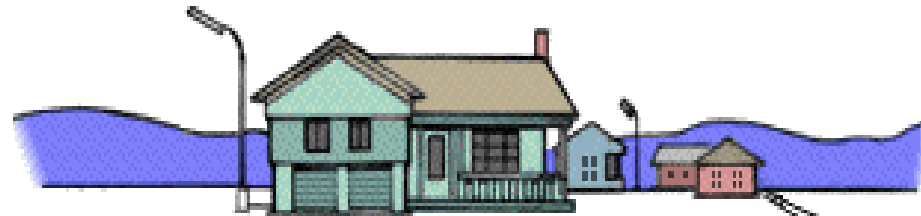
Containment Structure



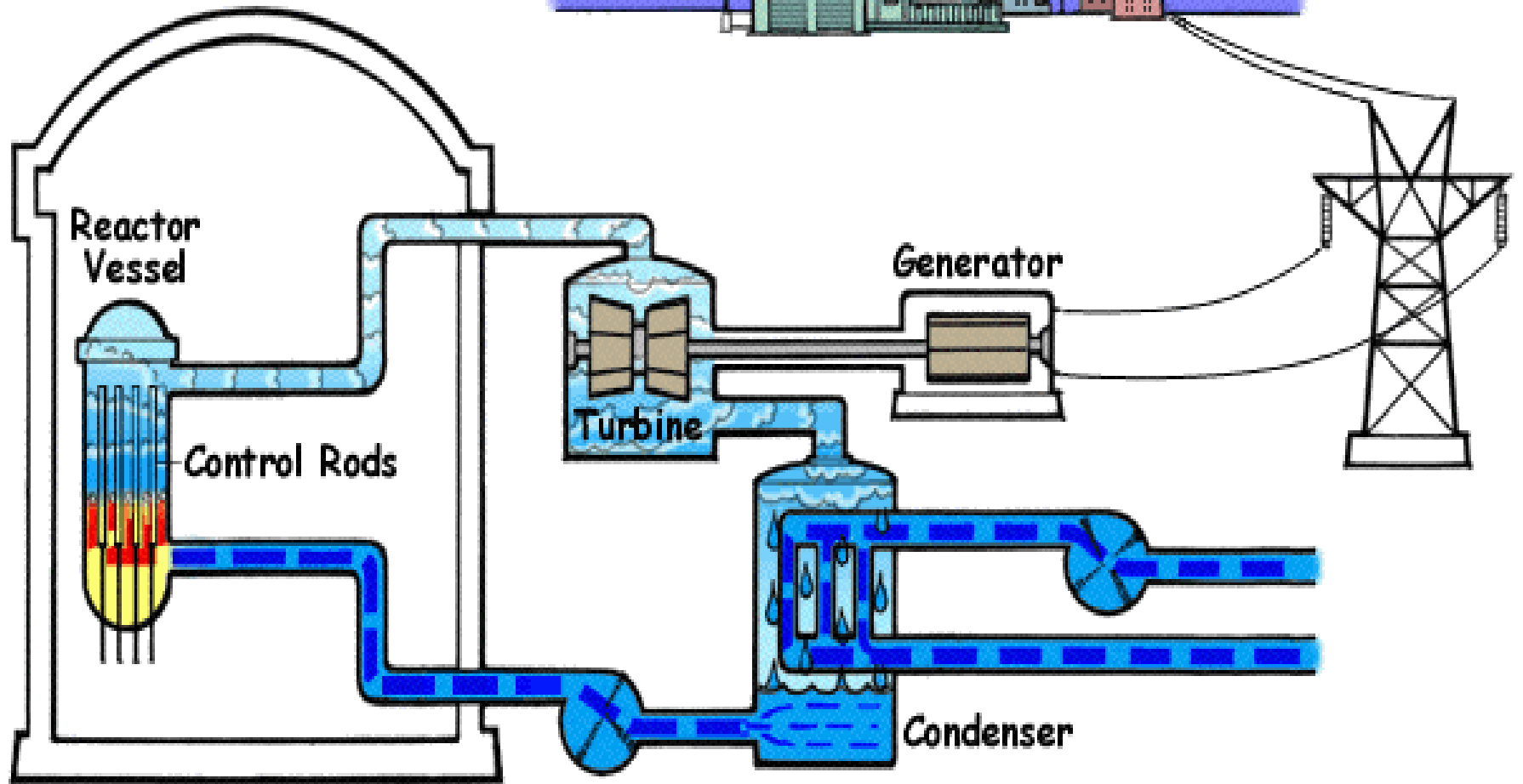
Pressurized Water Reactor System



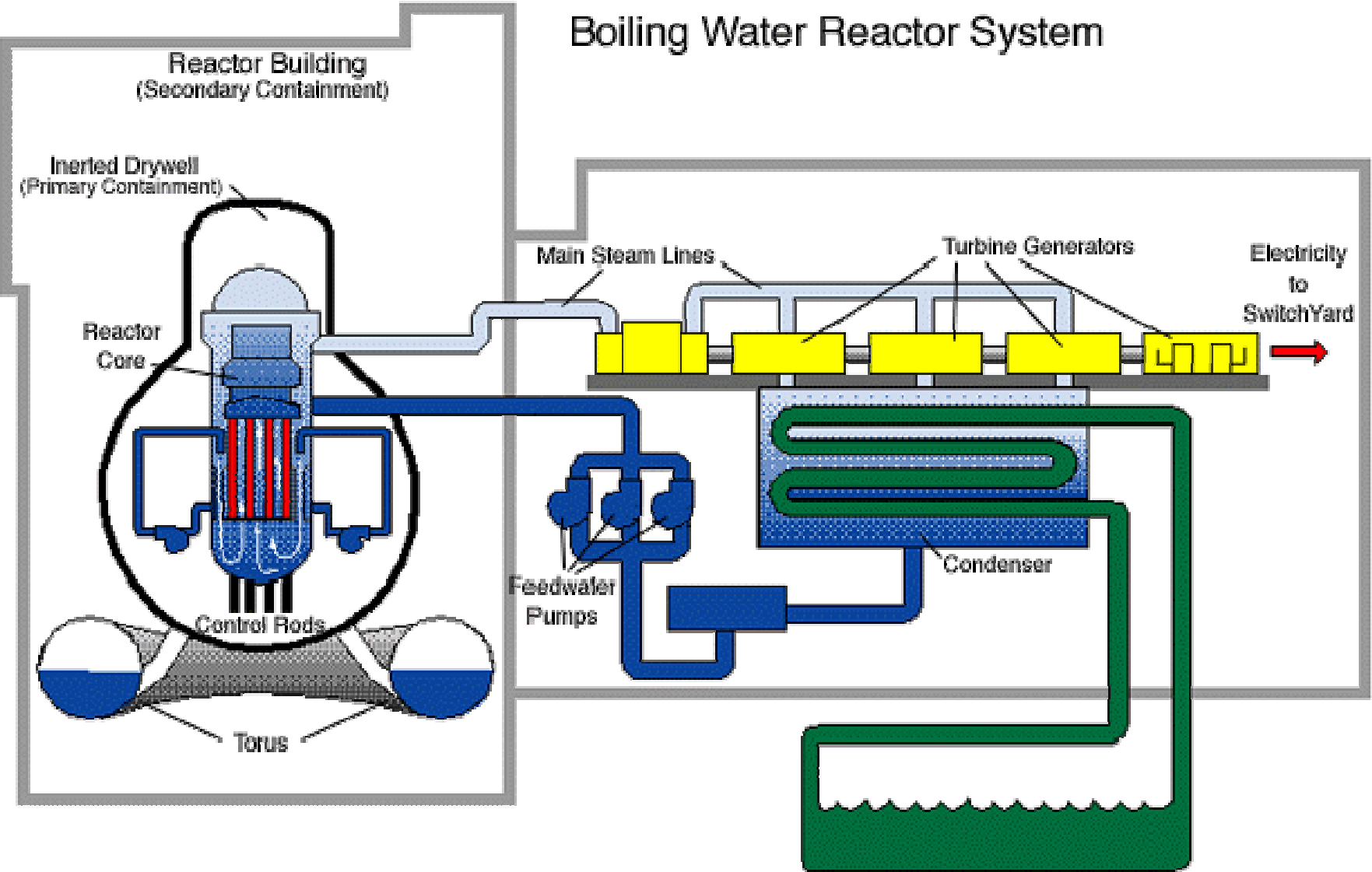
The Boiling Water Reactor (BWR)

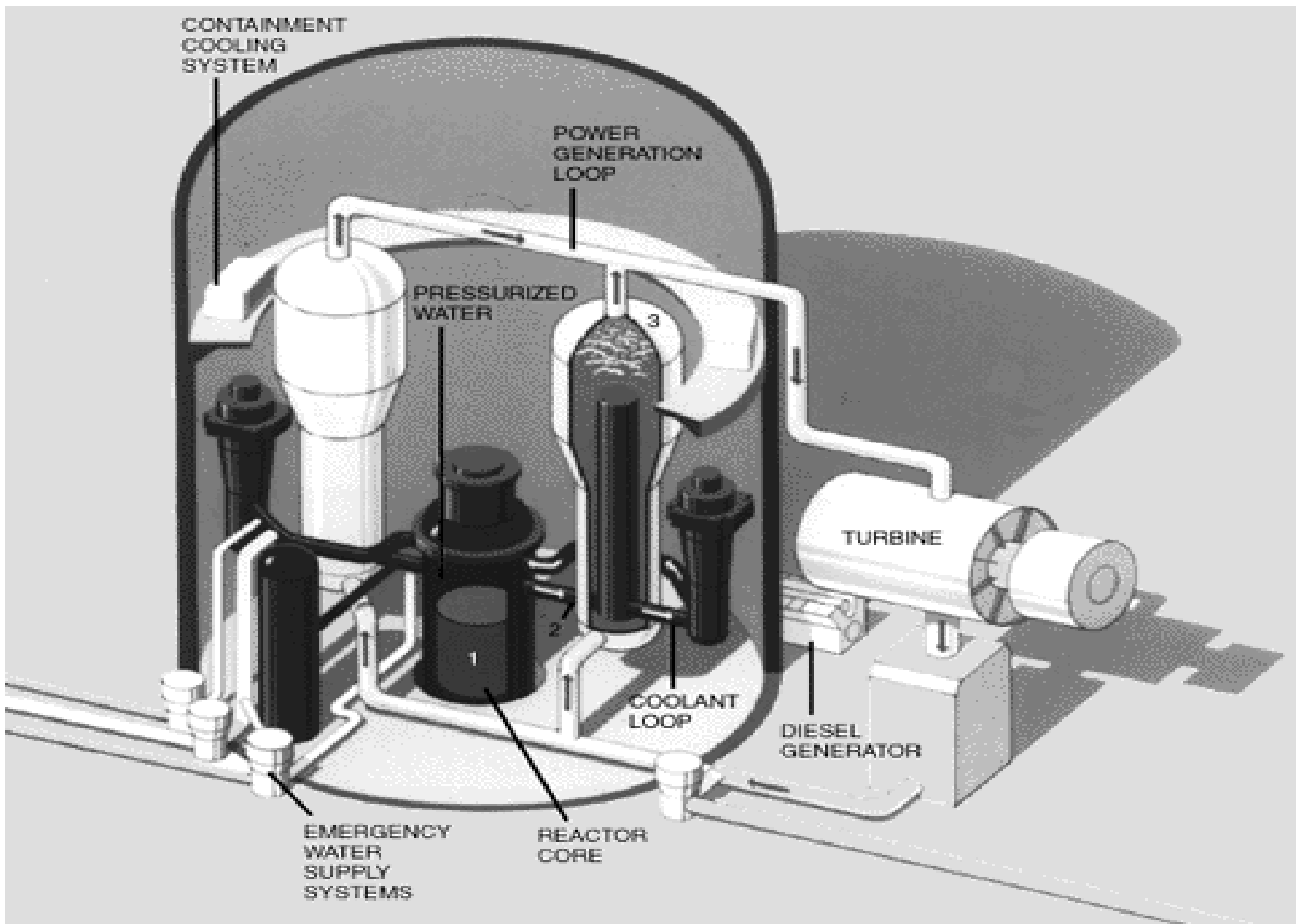


Containment Structure



Boiling Water Reactor System





Pressurized Water Reactor

VI. Energía Nuclear en Chile. Razones para una Decisión

- **Chile importa:**
 - **97% de petróleo.**
 - **78% del gas.**
 - **84% del carbón.**
- **$\frac{3}{4}$ de la matriz energética corresponden a estos elementos.**
- **La demanda de energía aumenta a índices superiores que el económico.**
- **Chile está ad-porta de una crisis energética que puede poner en riesgo, incluso, nuestra soberanía.**
- **Las denominadas energías renovables no convencionales (ERNC), como la eólica, solar etc, hoy se acercan al 2% y con suerte el 2015 llegaría al 5%. *No es solución.***

➤ **Si se considera que el ritmo de crecimiento que tiene Chile y que la demanda de energía se incrementa en forma considerable todos los años (~ 600 MW/año), esto deriva que en un plazo mediano (10 a 15 años) el actual sistema energético es insuficiente si se opera en base a las fuentes de abastecimientos y recursos actuales.**

➤ **La energía nuclear en Chile surge como una opción viable,**

➤ **La importancia de la energía nuclear en el día de hoy reside principalmente en el hecho de ser un tipo de energía que se caracteriza por ser:**

- **No contaminante y que no tiene ningún efecto negativo frente al calentamiento global y efecto invernadero.**

- **Por otro lado, aunque parezca extraño, tiene bajos costos comparativos respecto a otras fuentes energéticas como el gas, petróleo y carbón, que si son fuentes energéticas contaminantes de CO₂.**

- **La energía nuclear es de alto rendimiento**

Nuestra realidad energética requiere:

- **Utilizar en forma equilibrada diversas fuentes de energías que nos garanticen la soberanía necesaria y que comprenda como elementos bases de cualquier decisión los efectos contaminantes, su rentabilidad y estabilidad.**
- **Se deben tomar las decisiones adecuadas en los ámbitos necesarios que garanticen una política energética de estado, que esté por sobre cualquier coyuntura específica.**
- **En este contexto la energía nuclear en Chile es viable, necesaria y requiere un tratamiento como país.**
- **Por lo tanto, se deben buscar y generar los consensos al respecto, en forma abierta y colocando todas las cartas sobre la mesa.**

VI. Energía Nuclear en Chile. Acciones y Desafíos Futuros

- Desarrollar un acuerdo y consenso nacional sobre la factibilidad y necesidad de este tipo de energía.
- Crear un organismo de supervisión y de control independiente del poder político y técnicamente adecuado.
- Desarrollar normas para instalar, operar, disponer, desmantelar, etc, este tipo de centrales. Realizar estudios de sitio y normas antisísmicas.
- Desarrollar estudios de ingeniería sobre el detalle de las obras civiles.
- Desarrollar los estudios económicos que se requieran.
- Decidir e implementar acuerdos para compra de combustible nuclear (uranio).
- Crear los mecanismo de formación y capacitación de cuadros técnicos y profesionales adecuados.
- **Para poder disponer de este tipo de energía el año 2020, se requiere adoptar una decisión alrededor del 2010 ó 2012 a más tardar.**

Fuentes Información

- CNE, Comisión Nacional de Energía, Chile
- CCHEN, Comisión Chilena de Energía Nuclear
- Universidad Católica de Chile
- Instituto Libertad y Desarrollo, Chile
- CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina
- IAEA, Agencia Internacional de Energía Atómica,
Viena, Austria - ONU