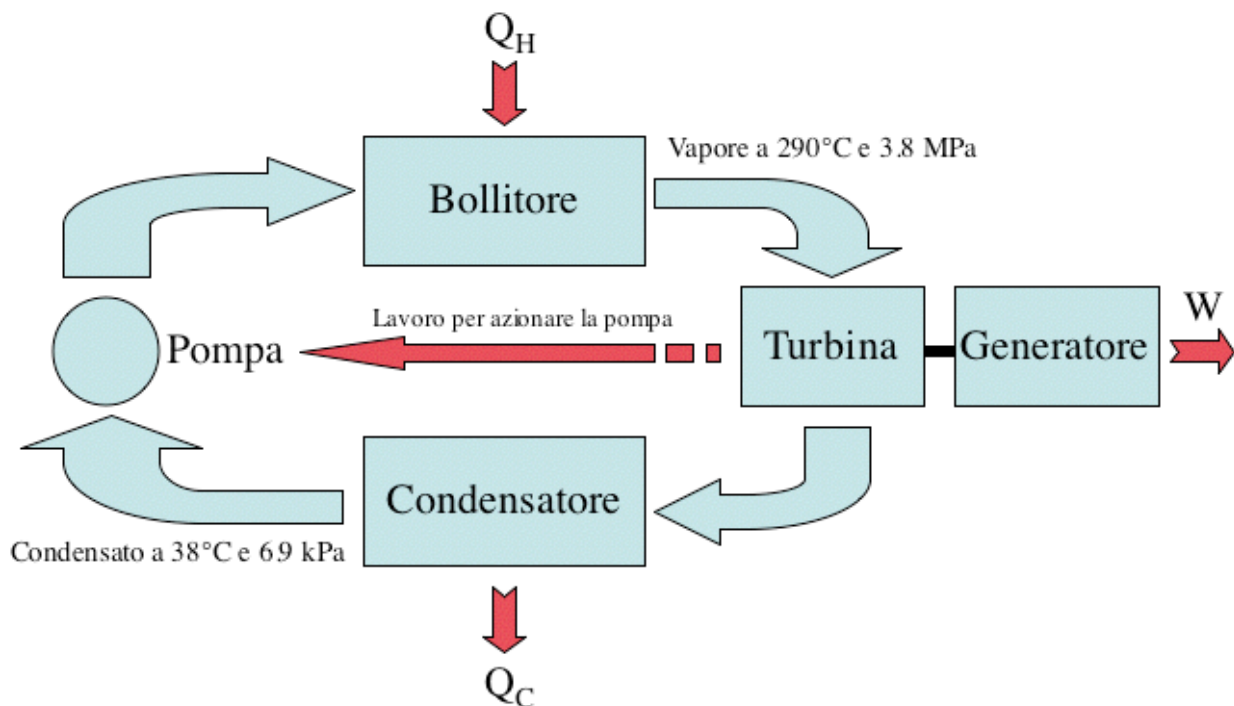


Termodinamica di una centrale termica ed introduzione ai problemi energetici

La parte iniziale di questa scheda è la traduzione con adattamenti del capitolo 4 del libro di H.C. van Ness, *Understanding Thermodynamics* (Dover Pub., New York 1969), ed illustra principalmente i problemi termici connessi agli impianti di generazione di energia. Si tratta di stimare i parametri di un impianto che genera energia elettrica per mezzo dell'espansione del vapore attraverso una turbina, utilizzando solo alcuni calcoli elementari. Lo schema basilare di un impianto di questo tipo è mostrato nella figura che segue. Ci sono quattro meccanismi principali nel ciclo di generazione. Il bollitore serve a convertire l'acqua liquida in vapore ad alta pressione e alta temperatura. Ciò richiede calore da una qualche sorgente termica ad alta temperatura; questo calore è indicato con il simbolo Q_H . Il vapore così generato viene passato ad una turbina che trascina un generatore elettrico. Questo turbogeneratore è naturalmente il cuore di tutto l'impianto. Il vapore si espande passando attraverso la turbina e fuoriesce a bassa pressione. Questo processo di espansione è adiabatico, e si cerca di renderlo quanto più reversibile possibile. Il vapore in uscita dalla turbina entra in un condensatore, che è raffreddato ad acqua: qui il vapore condensa e cede il calore Q_C al sistema di raffreddamento. Il vapore condensato viene quindi pompato verso il bollitore dove viene rivaporizzato. Una piccola frazione del lavoro prodotto nella turbina viene utilizzata per far funzionare la pompa.



Il calore Q_H può essere ottenuto bruciando combustibile fossile, come carbone o petrolio, oppure da un reattore nucleare: la termodinamica dell'apparato non cambia. Il ciclo mostrato nella figura devia solo leggermente da un ciclo di Carnot ideale. Il bollitore e il condensatore operano a temperatura costante (temperatura del bollitore T_H e del condensatore T_C) e

realizzano delle trasformazioni isoterme. Analogamente i processi dentro la turbina e la pompa sono con ottima approssimazione adiabatici e reversibili.

Ci si potrebbe chiedere come mai il vapore che esce dalla turbina non venga semplicemente rilasciato nell'atmosfera: ci sono parecchie ragioni per non farlo. Anzitutto questo vorrebbe dire che la pressione atmosferica è la pressione più bassa contro la quale si può espandere il vapore. Quando il sistema è chiuso la pressione del condensatore – che rappresenta lo scarico della turbina – può essere mantenuta a valori molto più bassi della pressione atmosferica. L'espansione aggiuntiva che si ottiene con la pompa significa che si estrae più lavoro dal vapore. E' altrettanto importante che l'acqua utilizzata nel circuito sia molto pura: la ragione è che tutti i sali in soluzione vengono rilasciati nel bollitore quando l'acqua viene vaporizzata, e alla fine le incrostazioni che si formerebbero con acqua non pura proveniente da una sorgente esterna renderebbero molto inefficiente lo scambio termico nel bollitore e intaserebbero il circuito dell'acqua. Per questo motivo l'acqua aggiunta al circuito deve essere sempre molto pura e questo è un processo costoso: in pratica si utilizza sempre la stessa acqua purificata in un circuito chiuso. Infine, come vedremo tra poco, il vapore viene generato in quantità enorme, e rilasciare tutto questo vapore nell'atmosfera potrebbe modificare in modo significativo il microclima della regione intorno all'impianto per parecchi chilometri. Naturalmente la condensazione del vapore nel condensatore significa che una grande quantità di calore Q_C deve venire dissipata in vicinanza dell'impianto, di solito in un fiume; ci sono problemi anche con questo, e li esamineremo più avanti.

Adesso concentriamoci su un caso specifico e consideriamo un impianto termoelettrico di dimensioni tipiche, capace di produrre una potenza elettrica di circa 750 MW. Il vapore viene generato nel bollitore a circa 290°C (≈ 563 K) e 3.8 MPa; il condensatore funziona a circa 38°C (≈ 311 K) e 6.9 kPa. Perciò la sorgente di calore, vale a dire il reattore nucleare, deve essere mantenuta ad una temperatura di almeno 290°C. e l'ambiente circostante che assorbe il calore del condensatore deve avere una temperatura vicina a 38°C. Un ciclo di Carnot che funziona tra queste due temperature ha un'efficienza termica

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{311K}{563K} \approx 0.448$$

e questo significa che l'impianto migliore non riesce a convertire più del 44.8% del calore del reattore nucleare in lavoro, mentre il restante 55.2% deve venire scartato nell'ambiente. Nessun motore reale riesce a raggiungere l'efficienza di un vero ciclo di Carnot, e noi prendiamo un'efficienza del 30% come stima realistica per il nostro impianto. Questo significa che la potenza totale prodotta dall'impianto è

$$\frac{750MW}{0.3} = 2.5GW$$

e di questa il 70% va nell'ambiente sotto forma di calore. Quindi l'ambiente circostante assorbe un flusso termico di $0.7 \cdot 2.5 GW = 1.75 GW$.

Ora, dai dati sul calore di evaporazione dell'acqua, sappiamo che l'entalpia di evaporazione dell'acqua vale circa 25 kJ/mole alla temperatura del bollitore (v. tabella),

Entalpia di evaporazione dell'acqua

T (°C)	$\Delta_{\text{vap}}H$ (kJ/mol)	T (°C)	$\Delta_{\text{vap}}H$ (kJ/mol)
0	45.054	200	34.962
25	43.990	220	33.468
40	43.350	240	31.809
60	42.482	260	29.930
80	41.585	280	27.795
100	40.657	300	25.300
120	39.684	320	22.297
140	38.643	340	18.502
160	37.518	360	12.966
180	36.304	374	2.066

Marsh, K. N., Ed., *Recommended Reference Materials for the Realization of Physicochemical Properties*, Blackwell, Oxford, 1987.

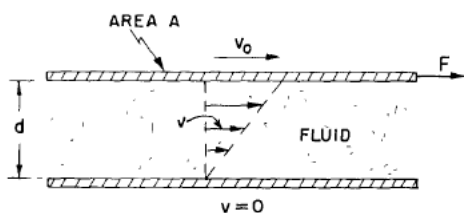
e quindi – visto che il calore dalla sorgente ad alta temperatura viene usato tutto per fare evaporare l'acqua nel bollitore – la velocità di produzione del vapore (massa per unità di tempo) è $\dot{m} \approx 2.5 \text{ GW}/25 \text{ kJ/mole} = 10^5 \text{ mole/s} = 1.8 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$, vale a dire a circa 110 tonnellate ogni minuto. Si potrebbe pensare che un motore termico di queste dimensioni sia troppo grande, ma in realtà corrisponde agli impianti nucleari in funzione da molti anni. Quanto deve essere grande il tubo che fornisce il vapore alla turbina? Il vapore nel bollitore si trova a 290°C ($\approx 563 \text{ K}$) e 3.8 MPa e quindi una mole di vapore corrisponde ad un volume molare $V = RT/P \approx 0.00123 \text{ m}^3/\text{mole}$, e tenendo conto che il peso molare dell'acqua è 18 g/mole , si trova che la densità è $\rho \approx 14.6 \text{ kg/m}^3$ (in realtà il vapore acqueo non si comporta proprio come un gas ideale e questa densità va corretta: quella giusta è 16.99 kg/m^3 , inoltre la viscosità del vapore in queste condizioni di pressione e temperatura è $\eta \approx 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; per una tabella delle caratteristiche del vapore in varie condizioni di pressione e temperatura si veda ad es.

http://www.spiraxsarco.com/esc/default.asp?redirect=SH_Properties.aspx).

Si ricordi ora che il numero di Reynolds è definito dalla formula¹

$$R = \frac{\rho v L}{\eta}$$

¹ La viscosità η serve a quantificare la forza di attrito fra strati di fluido adiacenti nel caso di moto laminare:



$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v_0}{d}$$

dove L è una dimensione lineare caratteristica del sistema (per un tubo a sezione circolare si prende di solito il diametro del tubo) e v è la velocità. Il moto del vapore nel tubo è laminare (non turbolento) se $R < 2300$ (questo è un criterio empirico derivato dall'esperienza), e quindi perché il moto sia laminare si deve avere approssimativamente

$$vr < \frac{1000\eta}{\rho}$$

D'altra parte nel nostro sistema abbiamo un flusso di vapore

$$\dot{m} = \rho v \pi r^2$$

e quindi

$$vr = \frac{\dot{m}}{\rho \pi r}$$

da cui si trova

$$\frac{\dot{m}}{\rho \pi r} < \frac{1000\eta}{\rho}$$

e infine

$$r > \frac{\dot{m}}{1000\pi\eta} \approx \frac{1.8 \cdot 10^3 \text{ kg/s}}{1000\pi \cdot 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ m}$$

Questo valore è più grande di qualunque tubo realizzabile in pratica, e quindi il moto del vapore è certamente turbolento (questo contribuisce a ridurre l'efficienza dell'impianto).

In pratica, in impianti di questo tipo la velocità del vapore ad alta pressione nel tubo è dell'ordine di 20 m/s, e quindi la sezione del tubo ha un raggio determinato da

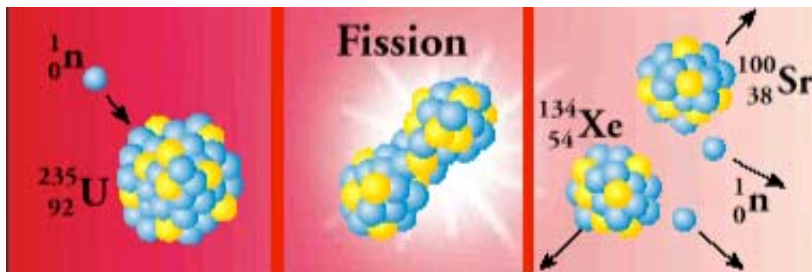
$$r = \sqrt{\frac{\dot{m}}{\rho v \pi}} \approx \sqrt{\frac{1.8 \cdot 10^3 \text{ kg/s}}{\pi (17 \text{ kg/m}^3) (20 \text{ m/s})}} \approx 1.3 \text{ m}$$

e una sezione di circa 5.3 m².

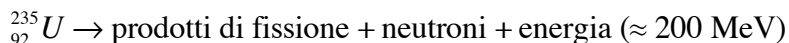
Ci sono altre quantità che possiamo calcolare, ad esempio se il generatore è termonucleare allora l'energia viene dalla disintegrazione di una certa quantità di massa. Poiché la potenza totale prodotta dall'impianto sotto forma di calore è di 2.5 GW e ci sono circa $3.14 \cdot 10^7$ s in un anno, allora il calore totale prodotto in un anno corrisponde a circa $7.9 \cdot 10^{16}$ J. D'altra parte dalla formula $E = mc^2$ possiamo calcolare che

$$m = \frac{E}{c^2} \approx \frac{7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} \approx 0.9 \text{ kg}$$

La massa totale del combustibile nucleare diminuisce di poco meno di 1 kg all'anno in un impianto di questo tipo. Il bilancio però non si conclude qui, la realtà è più complicata. L'energia in un reattore nucleare viene prodotta principalmente dalle reazioni di fissione dell' U^{235} (indotta da un neutrone), come mostrato nella figura seguente

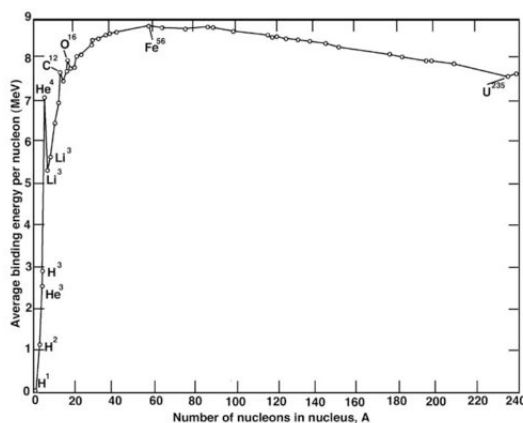


La reazione è²

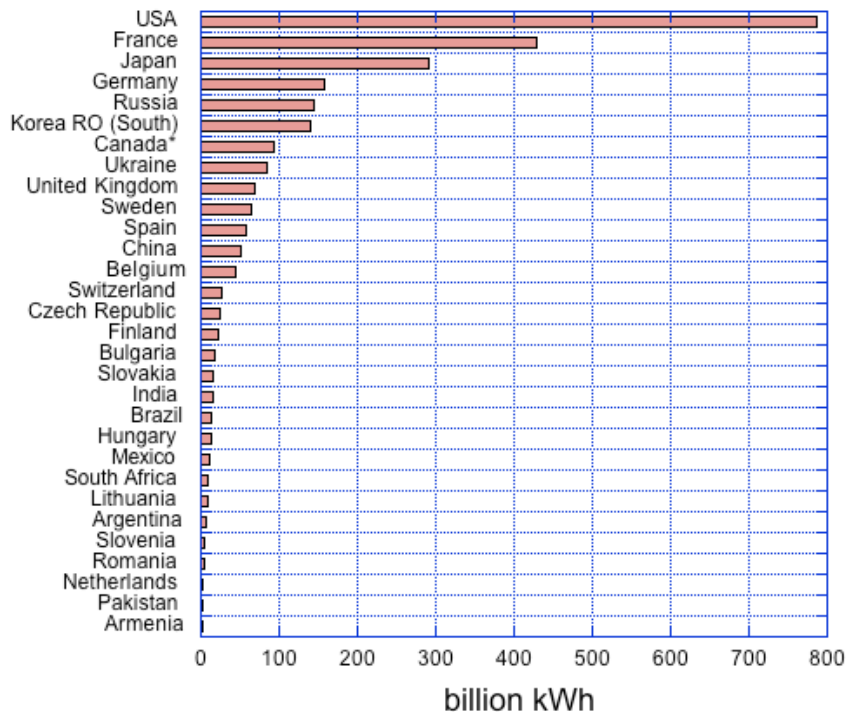
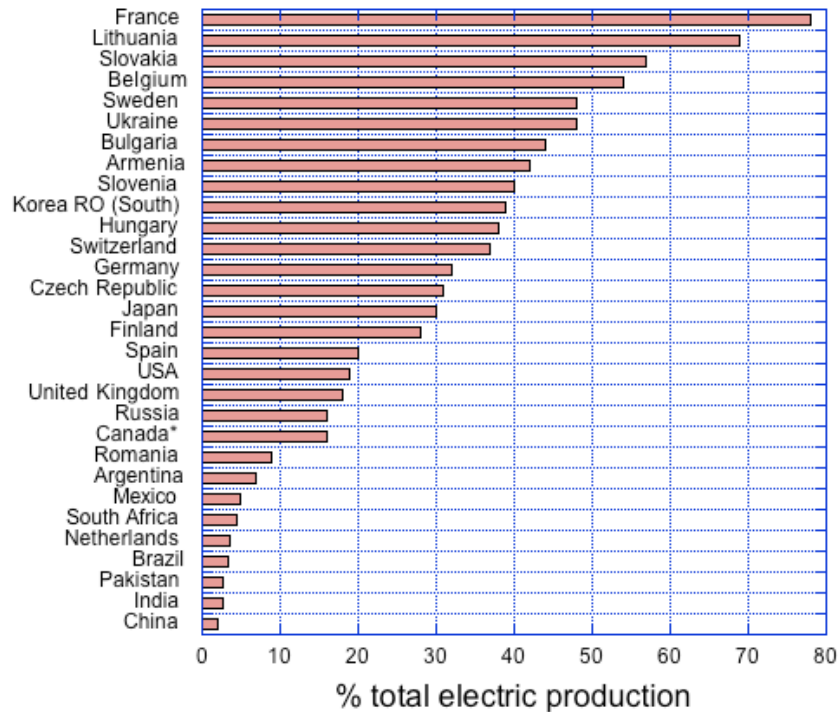


La quantità di energia prodotta in una singola reazione di fissione, $200 \text{ MeV} \approx 3.2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$, implica che ci vogliono circa $8 \cdot 10^{19}$ reazioni di fissione al secondo per produrre 2.5 GW, e quindi l'uranio fissile si converte in prodotti di fissione alla velocità di $1.3 \cdot 10^4 \text{ mol/s} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s} \approx 950 \text{ kg/anno}$. L'uranio arricchito contenuto in un reattore nucleare contiene solo il 3.3%-4% circa di uranio fissile (U^{235}), mentre il resto è costituito da U^{238} , non fissile, e quindi un reattore nucleare consuma circa 25 tonnellate di combustibile nucleare all'anno (qui, per semplicità, trascuriamo il fatto che questo combustibile usato contiene anche plutonio che può poi essere utilizzato per produrre altro combustibile nucleare). La densità dell'uranio è circa $19 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, e quindi un reattore nucleare come quello che stiamo considerando produce poco più di un metro cubo (1.3 m^3) di combustibile usato all'anno.

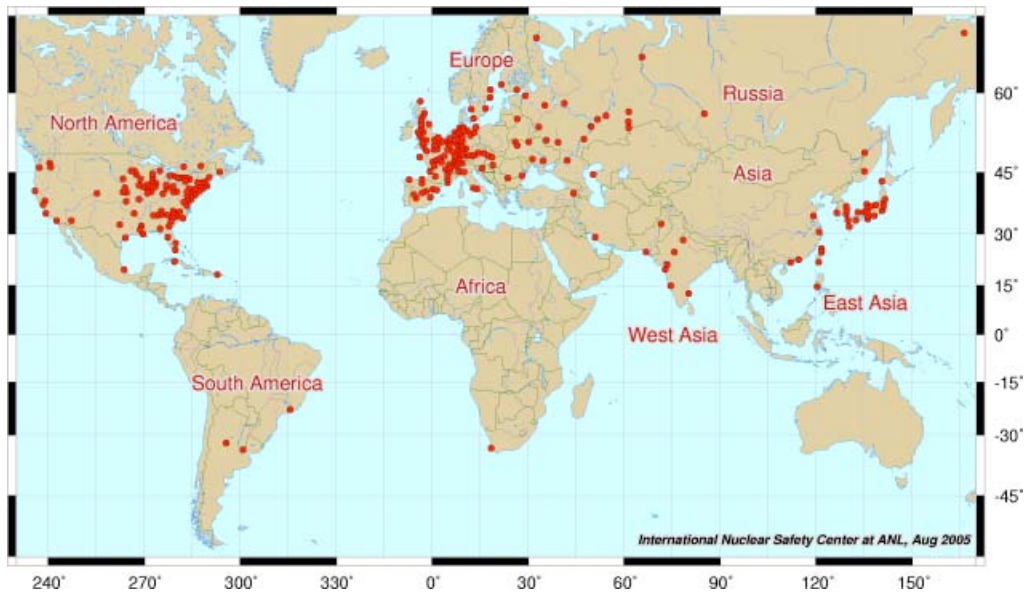
² Questa è una reazione di fissione, ci sono anche le reazioni di fusione. La produzione di energia in reazioni nucleari è legata all'energia potenziale di legame dei nuclei: si tratta di un'energia negativa che si somma alla massa dei nucleoni. Per esempio, l'unità di massa atomica (u) è definita come 1/12 della massa del carbonio 12 (^{12}C), ma la massa dei nucleoni separati vale circa 12.095646 u, e quindi c'è un *difetto di massa* di circa 0.095646 u. Il difetto di massa è una funzione del numero atomico (v. figura) ed è massimo per il ferro.



Attualmente ci sono circa 436 impianti nucleari nel mondo, che generano circa 370 GW di energia elettrica (fonte: IAEA) in 32 paesi, circa un sesto del fabbisogno mondiale di energia elettrica. Alcuni paesi dipendono in modo vitale da questa produzione (v. figura seguente)



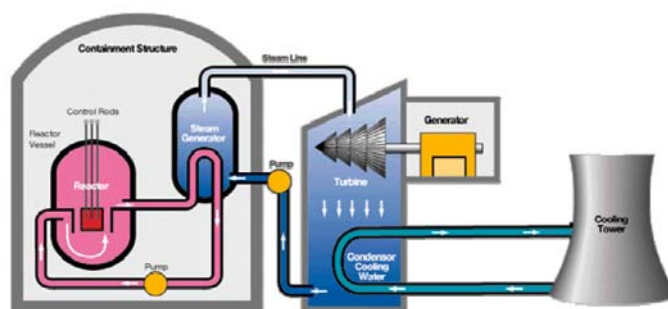
Frazione dell'energia elettrica prodotta da energia nucleare, e produzione totale in miliardi di kWh (fonte: World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/>, dati recuperati il 23/5/2008)



Mappa degli impianti nucleari nel Mondo (fonte International Nuclear Safety Center, <http://www.insc.anl.gov/>)



Mappa degli impianti nucleari in Europa (fonte International Nuclear Safety Center, <http://www.insc.anl.gov/>)



La figura mostra lo schema di un impianto nucleare tipo PWR (Pressure Water Reactor = reattore con acqua sotto pressione) simile a quello che abbiamo considerato sopra (più del 60% degli impianti funzionanti è realizzato in questo modo).

L'impianto term nucleare che abbiamo considerato assorbe circa $7.9 \cdot 10^{16}$ J all'anno. Se la centrale è a gas e brucia metano, allora si deve partire dall'entalpia di combustione del metano (CH_4 , peso molecolare ≈ 16 g/mole) che vale circa 890 kJ/mol = $8.9 \cdot 10^5$ J/mol = $5.6 \cdot 10^7$ J/kg a pressione atmosferica standard. Quindi la massa di metano da bruciare per ottenere $7.9 \cdot 10^{16}$ J è

$$m = \frac{7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{5.6 \cdot 10^7 \text{ J/kg}} \approx 1.4 \cdot 10^9 \text{ kg} \quad \text{oppure} \quad \frac{7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{8.9 \cdot 10^5 \text{ J/mole}} \approx 8.9 \cdot 10^{10} \text{ mole}$$

Se il metano proviene da un impianto di rigassificazione, si deve tenere in conto che parte dell'energia viene persa nel processo di compressione o di rigassificazione (il metano è liquido durante il trasporto e può venire trasportato liquefatto a pressione atmosferica e a bassa temperatura – circa 100 K – oppure a temperatura ambiente ma ad alta pressione – circa 100 atmosfere); comunque si tratta di una quantità di energia piuttosto piccola, ad esempio l'entalpia di vaporizzazione è 8.19 kJ/mol, circa l'1% dell'entalpia di combustione. Nel nostro calcolo trascuriamo questa piccola perdita energetica.

Supponiamo che il metano venga trasportato in bombole alla pressione di circa 100 atmosfere e a temperatura ambiente: in queste condizioni la densità del metano vale circa 5 mol/litro, e quindi la massa di metano che abbiamo calcolato sopra corrisponde a circa $1.8 \cdot 10^{10}$ litri = $1.8 \cdot 10^7$ m³. Se ipotizziamo che il trasporto avvenga con navi con uno spazio di carico utile di $100 \cdot 20 \cdot 10 \text{ m}^3 = 2 \cdot 10^4 \text{ m}^3$, si vede che ci vogliono circa 1000 navi all'anno per alimentare una centrale come quella che stiamo considerando. Il trasporto criogenico è più conveniente dal punto di vista del trasporto, perché la densità del metano liquido a pressione atmosferica alla temperatura di trasporto (≈ 110 K) vale circa 27 mol/litro, e quindi bastano meno di 200 navi come quelle sopra. La densità del metano gassoso a pressione atmosferica e temperatura ambiente (300 K) è praticamente uguale a quella di un gas perfetto (0.040 mol/litro), e quindi il volume del metano gassoso che stiamo considerando è circa uguale a $2.2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Poiché c'è un atomo di carbonio in una molecola di metano così come in una molecola di CO_2 , questo è anche il volume di anidride carbonica prodotto dalla combustione.

La tabella che segue mostra i progetti attualmente in corso in Italia

Regione	Ubicazione	Tipologia impianto	Capacità di rigassificazione nominale annuale (GSmc/a)	Società proponente	Autorizzazione MSE alla realizzazione e all'esercizio
Veneto	Rovigo	offshore	8	GNL Adriatico Srl	Autorizzato
Puglia	Brindisi	onshore	8	Brindisi LNG Spa	Autorizzazione sospesa
Toscana	Livorno	offshore su nave	3,75	OLT Offshore LNG Toscana Spa	Autorizzato
Toscana	Rosignano (LI)	onshore	8	Edison Spa	Non emessa
Liguria	Panigaglia	onshore	12,92 (potenziamento)	Gnl Italia Spa	Non emessa
Puglia	Taranto	onshore	8	Gas Natural Internacional	Non emessa
Calabria	Gioia Tauro (RC)	onshore	12	LNG MedGas Terminal	Non emessa
Sicilia	Porto Empedocle (AG)	onshore	8	Nuove Energie Srl	Non emessa
Sicilia	Melilli (SR)	onshore	I fase: 8 II fase: 12	Ionio Gas Srl	Non emessa
Friuli	Zaule (TS)	onshore	8	Gas Natural Internacional	Non emessa
Friuli	Trieste	offshore	8	Terminal Alpi Adriatico Srl	Non emessa
Emilia Romagna	Ravenna	offshore	8	Atlas Ing.	Non emessa
Lazio	Civitavecchia	onshore	12	Compagnia del Gas di Civitavecchia Srl	Non emessa
Marche	Senigallia / Ancona	offshore	I fase: 5 II fase: 10	Gaz de France	Non emessa

Fonte: Ministero dello sviluppo economico (aggiornamento al 31 gennaio 2008) e comunicazioni degli operatori

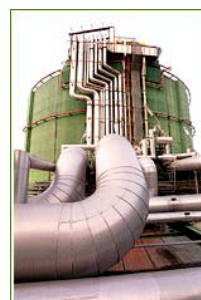
Questi impianti andranno ad complementare l'unico impianto di rigassificazione attualmente esistente a Panigaglia in provincia di La Spezia (v. box), con una capacità di 2 Gm³/anno:

Il Polo di GNL di Panigaglia

(tratto dal sito:

<http://www.snamretegas.it/italiano/infrastruttura/rigassificazione.html>)

L'impianto proprietà di GNL Italia S.p.A., situato in località Fezzano di Portovenere (SP), è l'unica struttura per la ricezione e la rigassificazione di Gas Naturale Liquefatto (GNL) esistente in Italia. Tra il 1990 e il 1996 è stato realizzato un importante intervento di riqualificazione paesaggistico-ambientale, elaborato dalla scuola di Architettura e del Paesaggio di Genova, che ha favorito l'inserimento dello stabilimento nel paesaggio circostante.



Il terminale occupa un'area di circa 45.000 metri quadrati ed è costituito da due serbatoi di stoccaggio di 50.000 metri cubi ciascuno, da impianti di vaporizzazione e da un pontile di attracco per le navi metaniere. L'impianto, in funzione dal 1971, ha immesso in rete nel 2004 circa 2 miliardi di metri cubi di gas.

Produzione di gas naturale (fonte: CIA World Book 2005)

	Paese	Produzione annuale di gas naturale (milioni di m ³)	Data dell'informazione
1	Mondo	2 640 000	2001 stimato
2	Russia	587 000	2005 stimato
3	USA	548 100	2001 stimato
4	Unione Europea	239 200	2001
5	Canada	165 800	2003 stimato
6	Regno Unito	105 900	2001 stimato
7	Algeria	80 300	2001 stimato
8	Iran	79 000	2003 stimato
9	Olanda	77 750	2001 stimato
10	Indonesia	77 600	2003 stimato
11	Arabia Saudita	56 400	2002
12	Uzbekistan	55 800	2004
13	Norvegia	54 600	2001 stimato
14	Turkmenistan	54 600	2004 stimato
15	Malesia	53 660	2001 stimato
16	Messico	47 300	2004 stimato
17	Emirati Arabi Uniti	44 400	2003 stimato
18	Argentina	37 150	2001 stimato
19	Cina	35 020	2003
20	Australia	33 080	2001 stimato
21	Bahrain	32 700	2002 stimato
22	Qatar	32 400	2001 stimato
23	Venezuela	29 400	2003 stimato
24	Trinidad and Tobago	25 000	2003 stimato
25	Pakistan	23 400	2001 stimato
26	India	22 750	2001 stimato
27	Egitto	21 200	2001 stimato
28	Germania	21 000	2003
29	Ucraina	19 600	2003 stimato
30	Tailandia	19 400	2002 stimato
31	Kazakhstan	18 500	2004 stimato
32	Nigeria	15 680	2001 stimato
33	Italia	15 490	2001 stimato
34	Oman	13 770	2001 stimato
35	Romania	12 600	2003 stimato
36	Brunei	10 350	2001 stimato
37	Birmania	9 980	2003 stimato
38	Bangladesh	9 900	2001 stimato
39	Kuwait	8 700	2002 stimato
40	Bolivia	8 440	2004 stimato

Abbiamo già osservato che un impianto termoelettrico come quello considerato scarica nella riserva termica a bassa temperatura circa 1.75 GW di calore, e spesso la riserva termica a bassa temperatura è un fiume. Ma non basta un fiume piccolo, perché la quantità di calore prodotto è enorme. L'aumento di temperatura è dato dalla formula

$$\Delta T = \frac{1}{C} \left(\frac{P}{F} \right)$$

dove P è la potenza termica assorbita dalla riserva termica a bassa temperatura (in questo caso circa 1.75 GW), F è la portata d'acqua del fiume (in kg/s), e C è il calore specifico dell'acqua ($C \approx 4.184$ kJ/kg·K). La tabella seguente mostra l'aumento di temperatura calcolato per alcuni fiumi europei in diverse condizioni:

Fiume	Portata in regime di magra (m ³ /s)	ΔT (K)	Portata media (m ³ /s)	ΔT (K)	Portata massima (m ³ /s)	ΔT (K)
Danubio	1.000	0.42	6.400	0.07	16.000	0.03
Reno	500	0.83	2.200	0.19	10.000	0.04
Rodano	600	0.70	1.700	0.25	11.000	0.04
Senna	30	14.	350	1.2	2.400	0.17
Po	420	1.0	1.470	0.28	12.000	0.03
Ticino	54	7.7	350	1.2	5000	0.08

Come si vede l'inquinamento termico è una delle conseguenze indesiderabili della produzione di energia elettrica per mezzo di un impianto termico. Gli aumenti di temperatura riportati sopra si riferiscono ad un solo impianto termico con una potenza di 750 MW.

Si consideri ora la seguente tabella che riporta i dati relativi al consumo elettrico in Italia nel 2003 e 2004:

Bilancio dell'energia elettrica in Italia (anno 2004 - valori provvisori)				
	Bilancio		Variazioni	
	2004	2003	GWh	%
Produzione lorda	300.370	293.865	6.505	2,2%
Servizi ausiliari	13.723	13.682	41	0,3%
Produzione netta	286.647	280.183	6.464	2,3%
Ricevuta da fornitori esteri	46.426	51.486	-5.060	-9,8%
Ceduta a clienti esteri	791	518	273	52,7%
Destinata ai pompaggi	10.308	10.492	-184	-1,8%
Richiesta totale Italia	321.974	320.659	1.315	0,4%
Totale consumi	301.400	299.789	1.611	0,5%
Perdite <i>in % della richiesta</i>	20.574 (6,4%)	20.870 (6,5%)	-296	-1,4%
Richiesta totale Italia	321.974	320.659	1.315	0,4%

(tratto dal *Rapporto sulle attività del Gestore della rete di trasmissione nazionale aprile 2004-marzo 2005*, <http://www.grtn.it/ita/chisiamo/rapportoattivita/docs2005.asp>)

Dai dati in tabella si calcola facilmente che la richiesta media di potenza elettrica nel 2004 è stata di circa 89.44 GW, e questo corrisponde a 120 impianti termoelettrici come quello che abbiamo appena analizzato. Dove mettere tutti questi impianti? Una decina di impianti del genere sullo stesso fiume potrebbe produrre un aumento della temperatura intollerabile e trasformarlo in una fogna fumante dove possono crescere soltanto le alghe. Che fare? Quello dell'energia è uno dei problemi più complessi della nostra società, e alle generazioni future toccherà affrontare delle scelte non facili.