VENERDI' CULTURALI 2012

presso FIDAF – Roma, 20 aprile 2012

Energia per l'Umanità: la storia passata e le opzioni per il futuro

Intervento del Prof. Agostino Mathis

Prof. Agostino Mathis – *Via Bertero, 61 – 00156 ROMA (Italy) - Cell. 338-1901198*
c/o ENEA, Centro Ricerche Casaccia – Via Anguillarese, 301 – 00123 ROMA (Italy)
Tel.: ++39-06-3048-6540; Fax: ++39-06-3048-3176; E-mail: mathis@enea.it

VENERDI' CULTURALI 2012 presso FIDAF – Roma, 20 aprile 2012

Energia per l'Umanità: la storia passata e le opzioni per il futuro

Intervento del Prof. Agostino Mathis

Sommario

La evoluzione dell'Umanità, a partire dalla lontana preistoria, è strettamente condizionata dalla disponibilità di fonti energetiche abbondanti e di facile utilizzo. L'esplosione demografica dell'ultimo secolo è conseguenza dello sfruttamento sistematico di fonti fossili, peraltro limitate e comunque produttrici di enormi quantità di gas ad effetto-serra, ed in particolare di anidride carbonica (CO_2): questi gas potranno determinare l'evoluzione delle variabili climatiche, ivi comprese possibili destabilizzazioni rapide verso nuovi regimi climatici. Vengono quindi discussi i vantaggi ed i limiti delle opzioni energetiche che non emettono gas ad effetto-serra: le rinnovabili anche non programmabili, e la nucleare. Per il XXI secolo appena iniziato, le alternative di sviluppo delle tecnologie energetiche potranno avere rilevanti impatti sulle risorse e sul clima del Pianeta Terra. Si individuano quindi le sfide globali che l'umanità, e soprattutto i paesi più sviluppati, dovranno affrontare nei prossimi decenni.

La storia della popolazione umana: l’ultima era glaciale

La **popolazione di *Homo sapiens*** si è incrementata sul Pianeta **in stretta correlazione con le tecnologie** via via da esso messe a punto.

Per decine di migliaia di anni, **durante l’ultima era glaciale**, tale popolazione, essenzialmente costituita da **cacciatori-raccoglitori**, non doveva superare **qualche decina di milioni di individui sull’intero Pianeta**.

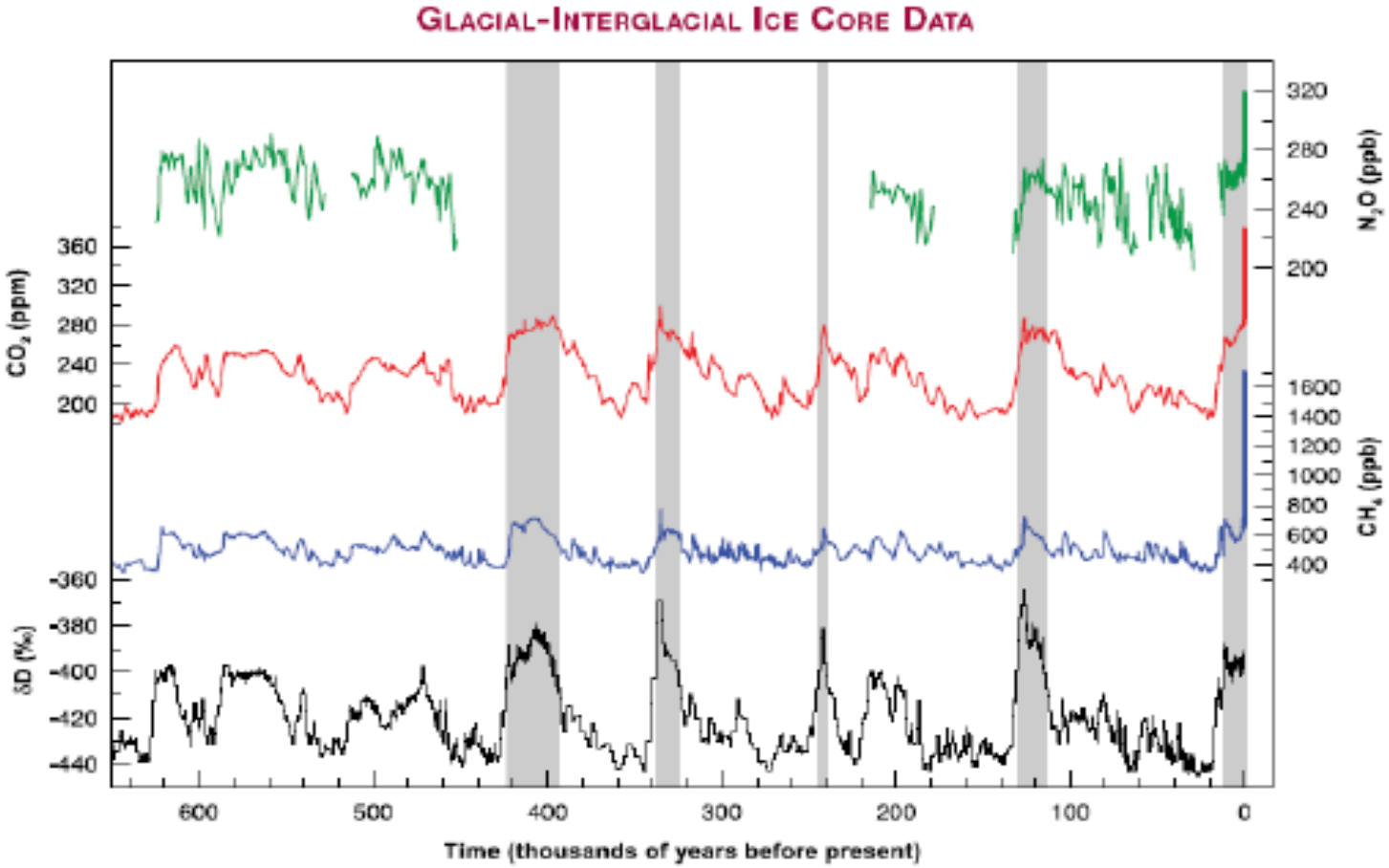


Figure TS.1. *Variations of deuterium (δD) in antarctic ice, which is a proxy for local temperature, and the atmospheric concentrations of the greenhouse gases carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O) in air trapped within the ice cores and from recent atmospheric measurements. Data cover 650,000 years and the shaded bands indicate current and previous interglacial warm periods. (Adapted from Figure 6.3)*

Fig. 4 – Alternanza di periodi glaciali ed interglaciali durante l'ultimo milione di anni. (Da: IPCC "Climate Change 2007 – The Physical Science Basis - Technical Summary – TS.2 Changes in Human and Natural Drivers of Climate – TS.2.1 Greenhouse Gases - TS.2.1.1 Changes in Atmospheric Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide" http://www.ipcc.ch/).

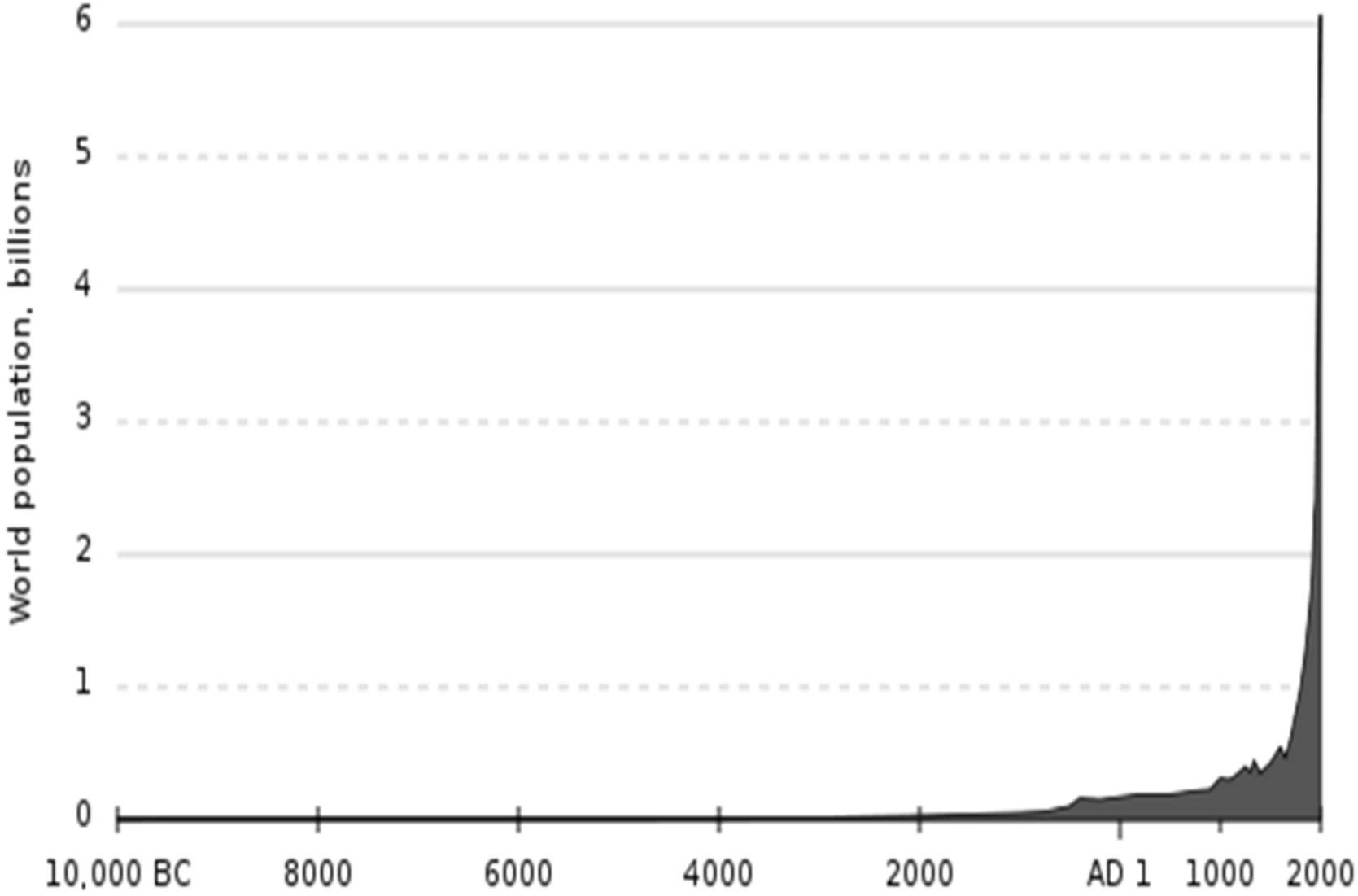
La storia della popolazione umana: la fine dell'era glaciale ed il neolitico

Con la fine dell'era glaciale, **circa 11.000 anni fa**, e probabilmente proprio grazie alla conseguente **stabilizzazione del clima**, l'*Homo sapiens* fu in grado di adottare su larga scala **le tecniche dell'agricoltura e dell'allevamento**, e quindi di costruire **centri stanziali** sempre più vasti (periodo delle **civiltà neolitiche**). Comunque, il tasso di incremento della popolazione **non dovette mai superare lo 0,1% all'anno**.

Da: P. Pellegrini "Meno nascite: futuro a rischio" il nostro tempo – 30 Ottobre 2011.

La storia della popolazione umana: l'attuale interglaciale

Le **civiltà neolitiche** comportarono **la più profonda trasformazione dell'ambiente naturale** finora verificatasi: **estinzione di molte specie animali**, in particolare la megafauna dell'era glaciale; **distruzione di vaste distese di foreste** per farne pascoli e campi; conseguente **liberazione di grandi quantità di CO_2 e di metano**, che potrebbero avere influito sul clima al punto da averne finora **ritardato la "naturale" tendenza verso una nuova era glaciale**. In questo modo, la popolazione umana fu in grado di raggiungere, ormai **in epoca storica, le centinaia di milioni di individui.**



Da: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Population_curve.svg

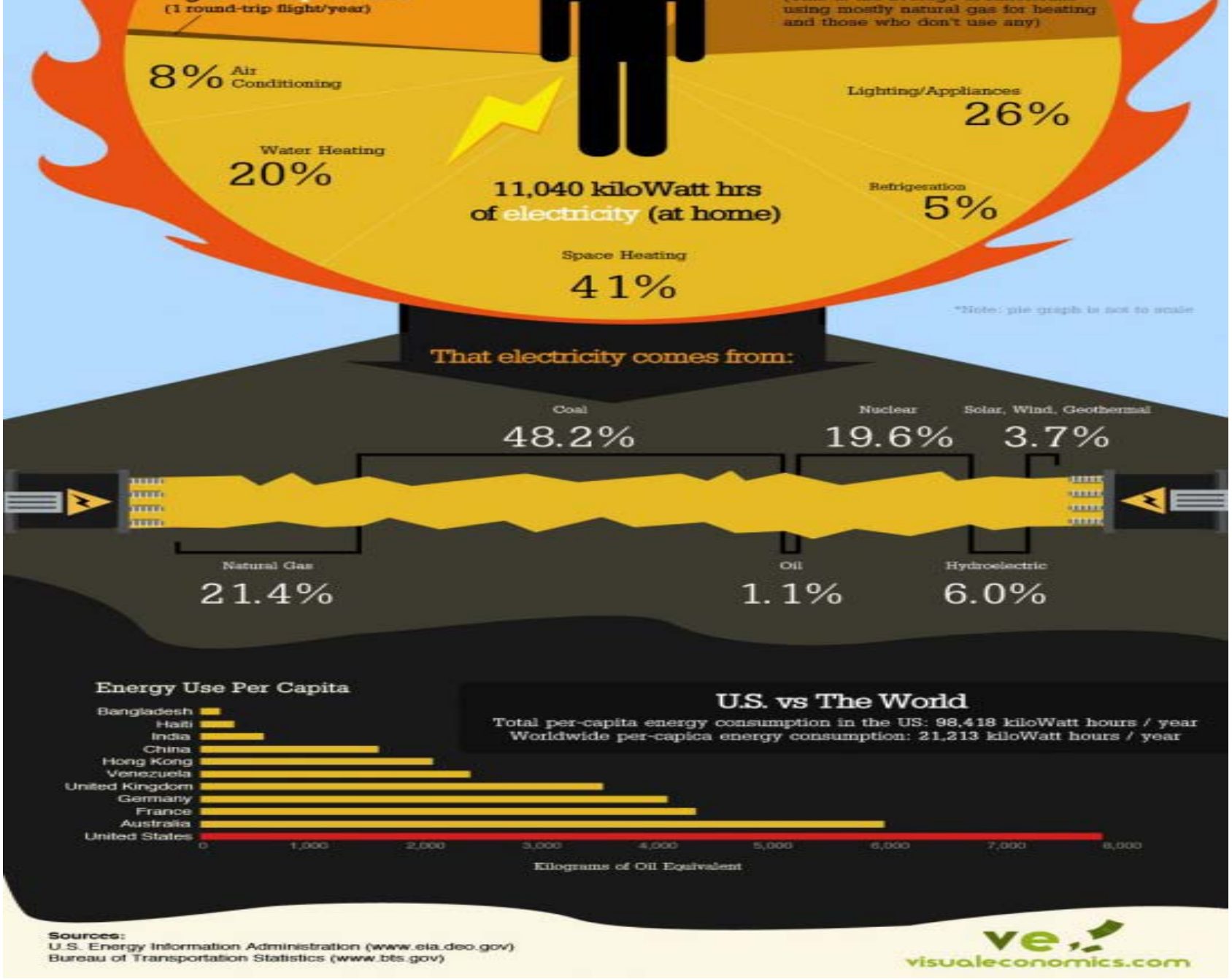
La storia della popolazione umana: la rivoluzione industriale

Soltanto **lo sviluppo della scienza moderna** a partire dal XVII secolo in Europa, e la conseguente **rivoluzione tecnologica ed industriale**, hanno permesso l'avvio di una **esplosione demografica** che in tre soli secoli ha portato la popolazione mondiale a **sette miliardi di individui** (il tasso di incremento, oggi in riduzione, aveva raggiunto un massimo del **2% all'anno**, cioè un raddoppio in 35 anni!).

Da: P. Pellegrini "Meno nascite: futuro a rischio" il nostro tempo – 30 Ottobre 2011.

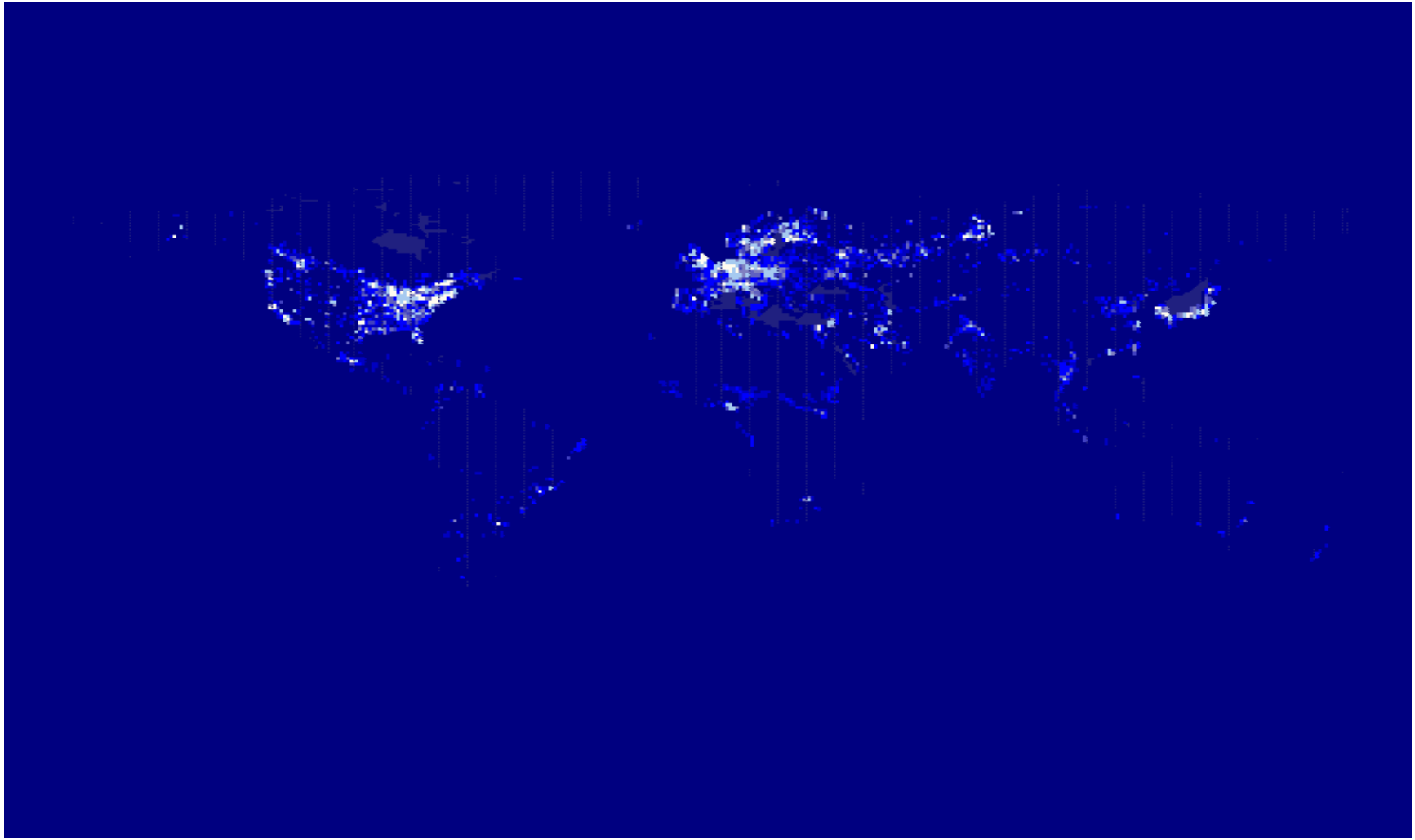
La storia della popolazione umana: energia e tenore di vita

Grazie allo sfruttamento sistematico di patrimoni naturali, in particolare delle **riserve fossili di energia ad alta concentrazione** (carbone, petrolio, metano), circa **un settimo della popolazione mondiale** ha oggi conseguito un **tenore di vita (e di consumi energetici)** mai visti nella storia, **e superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto al resto dell'umanità**.



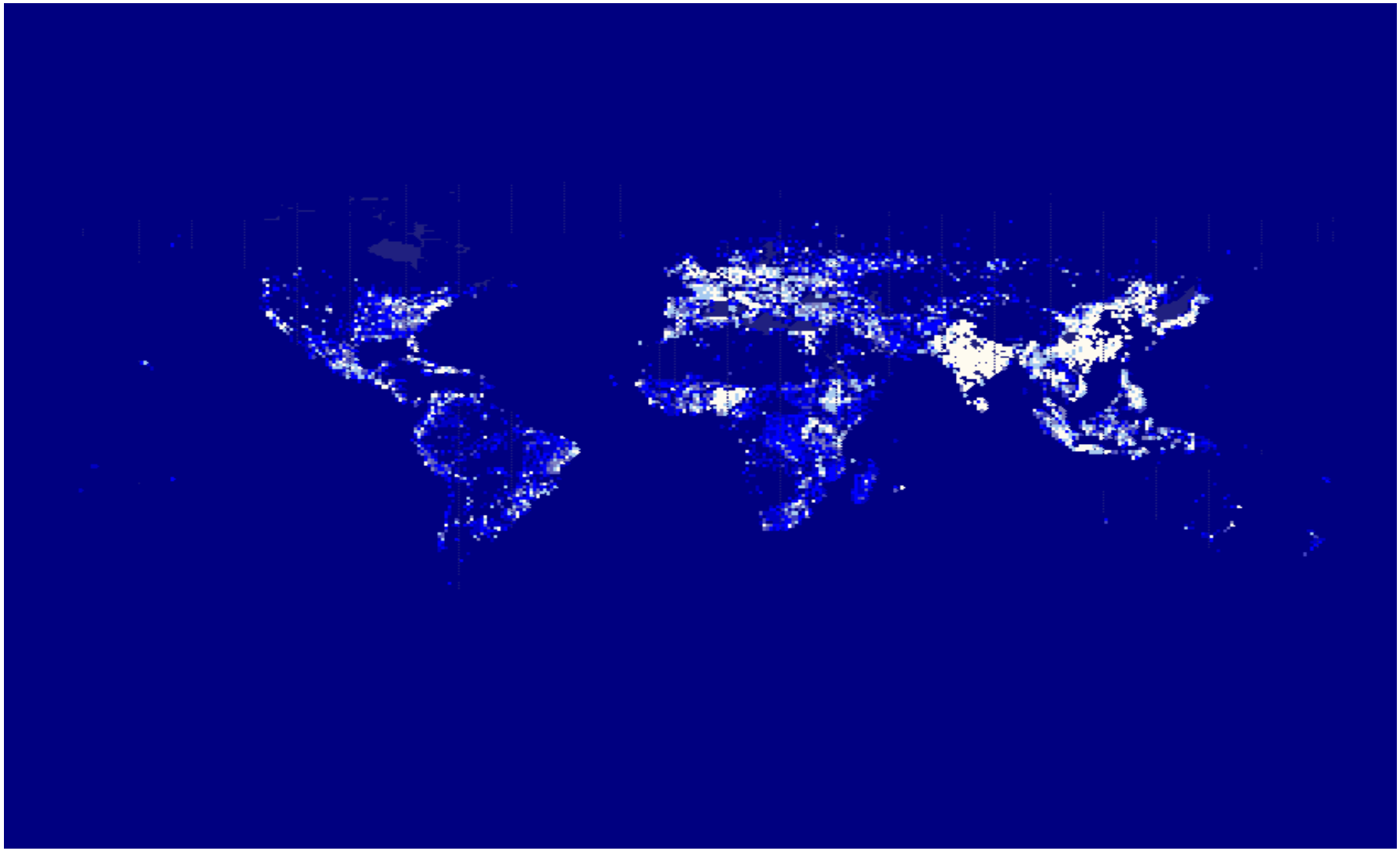
Da: http://www.tuttogreen.it/consumi-di-energia-nel-mondo-infografic/

Luminosità artificiale della Terra nel 1996



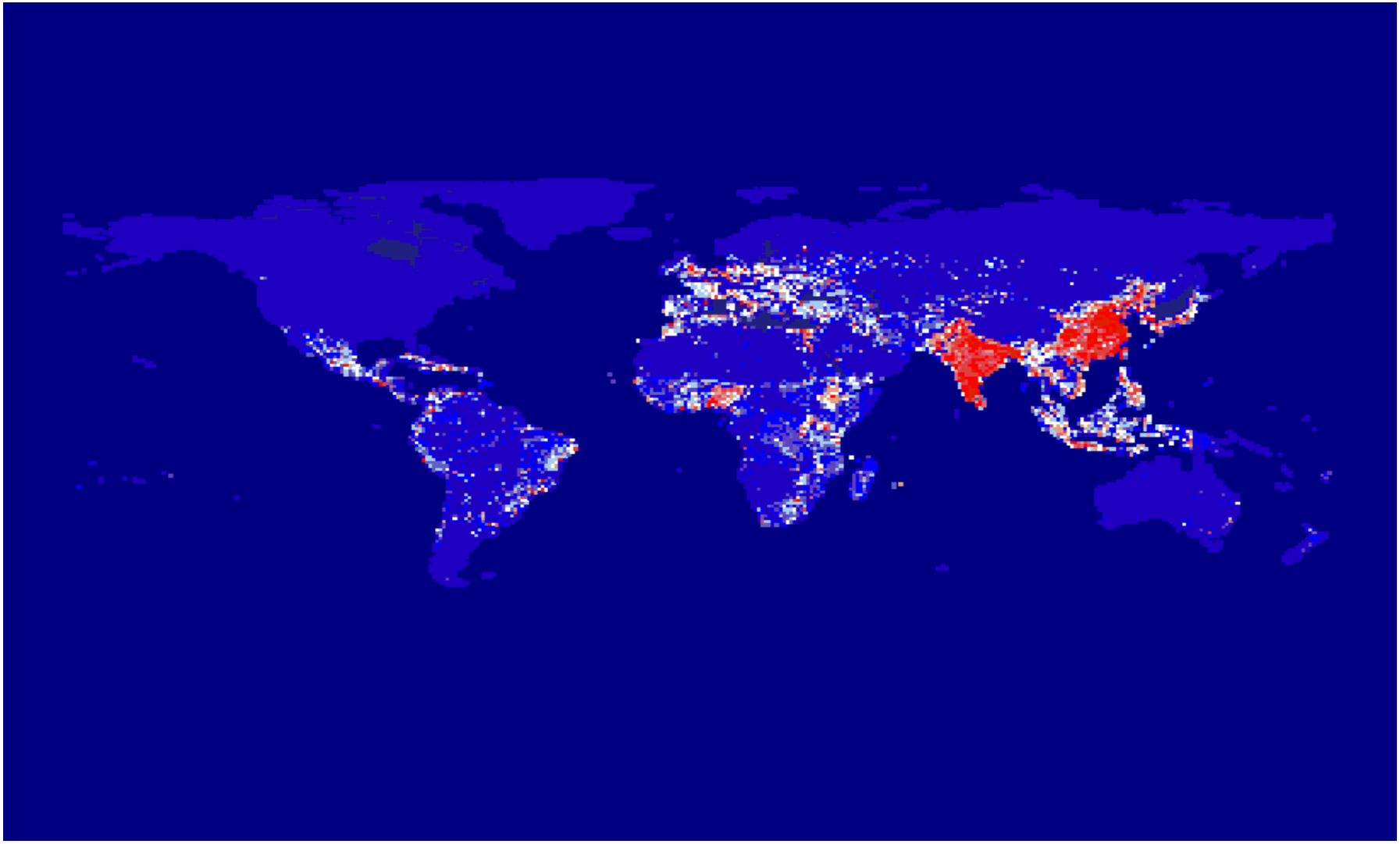
Flusso luminoso verso l'alto al culmine dell'atmosfera; dati forniti dalla versione a basso guadagno del Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System (DMSP/OLS), Elvidge et al., US National Geophysical Data Center. Fonte: J. Ausubel and N. Victor, 2006.

Luminosità artificiale della Terra se tutti i suoi abitanti facessero luce come quelli degli USA nel 1996



Fonte: J. Ausubel and N. Victor, 2006.

Incremento del flusso luminoso, se tutti gli abitanti della Terra, al di fuori degli USA, facessero luce come gli abitanti degli USA nel 1996: corrisponde alla **domanda latente di elettricità** (valori crescenti dal blu al bianco al rosso)



Fonte: Nadja Makarova Victor & Jesse Ausubel, 2004.

Energia e tenore di vita: i nuovi pretendenti

Di fatto, negli ultimi anni, **in modo imprevisto**, quasi **una metà dell'umanità ha intrapreso un elevato ritmo di sviluppo**: si tratta, come noto, di **Cina, India, Brasile, Sud-Africa e tutto il Sud Est asiatico**.

Energia e tenore di vita: che fare?

Alcuni ambientalisti e politologi sempre più di frequente suggeriscono di far fronte a questa emergenza con un **drastico controllo dello sviluppo demografico** (ovviamente non nei paesi sviluppati ormai a popolazione stabile o decrescente, ma **in quelli in via di sviluppo**).

Ma una tale politica appare anche più **difficile da fare accettare** ai paesi interessati rispetto ai piani di riduzione delle emissioni di gas-serra, ed in ogni caso avrebbe **effetti soltanto a lungo termine** (cioè ben oltre la metà di questo secolo, che viene considerata la data critica per la stabilità del clima).

Energia: la transizione in atto

La sfida che ora si pone è quella di **gestire al meglio la difficile transizione** verso una umanità di **10-12 miliardi di individui**, a ciascuno dei quali non può essere negato il diritto **ad un tenore di vita, e quindi a consumi energetici, paragonabili a quelli degli attuali paesi sviluppati** (non necessariamente quelli del cittadino degli USA, ma quelli ad esempio **dell'italiano medio di oggi**).

Una sfida epocale, politica e tecnica

Siamo allora di fronte ad **una sfida epocale, del tutto nuova per l'Umanità**, che dovrebbe essere affrontata con la **sistematica valorizzazione** di tutte le risorse **tecnologiche, ingegneristiche, organizzative e sociali** dovunque disponibili.

Decrescita dei paesi “ricchi”? Inutile

Certi **atteggiamenti “nostalgici”,** frequenti nei nostri paesi ricchi e “viziati”, esaltano la **decrescita economica** ed il **ritorno alla Natura**, ma sono **fuori luogo**.

Infatti, **se anche i paesi ricchi sparissero** dall’oggi al domani, e le risorse da essi consumate venissero destinate agli **altri paesi, questi migliorerebbero di poco** il loro tenore di vita, restando ben al di sotto delle loro aspettative.

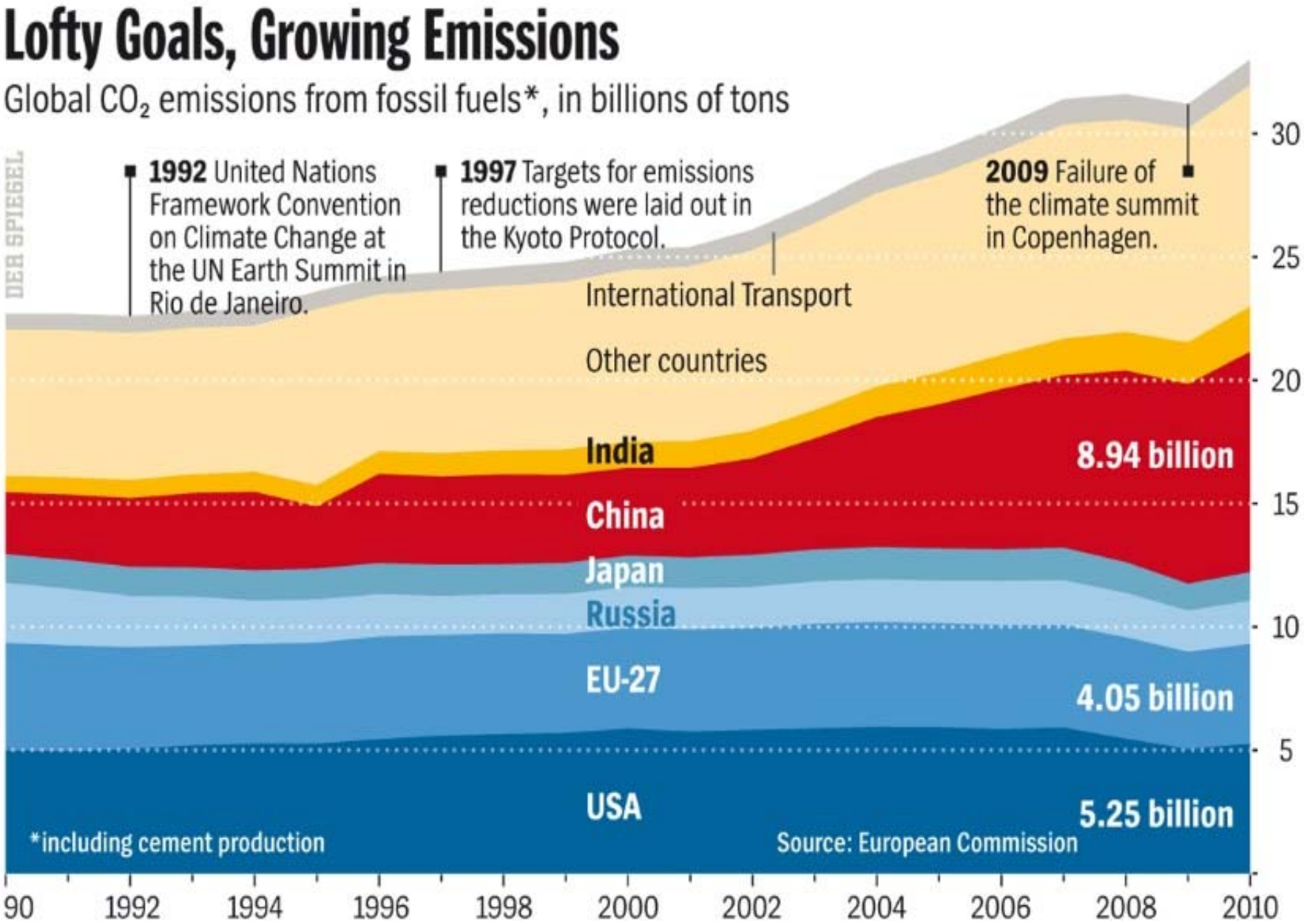
Il “ritorno alla Natura”: irrealistico

Il **“ritorno alla Natura”** per salvaguardare il Pianeta, poi, non dovrebbe certo limitarsi a ritornare a prima della rivoluzione industriale, quando già la rivoluzione agricola aveva profondamente stravolto l’ambiente “naturale”, ma dovrebbe **far riferimento al Paleolitico od anche prima**, quando il Pianeta poteva sostentare solo **qualche decina di milioni di individui**: **che fare allora del resto della popolazione attuale**?

Le conseguenze sugli ecosistemi

Nel corso del **XX secolo** la **popolazione** mondiale è **quadruplicata** e il suo **consumo di energia si è moltiplicata per 16**. In massima parte questa energia proviene dal bruciamento di **combustibili fossili**, con la conseguente **immissione nell'atmosfera di un crescente flusso di anidride carbonica (CO_2).**

Dall'era pre-industriale al 2011 la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera **è passata da circa 275 a circa 390 parti per milione (ppm)**.



Da: DER SPIEGEL – 18 Oct. 2011.

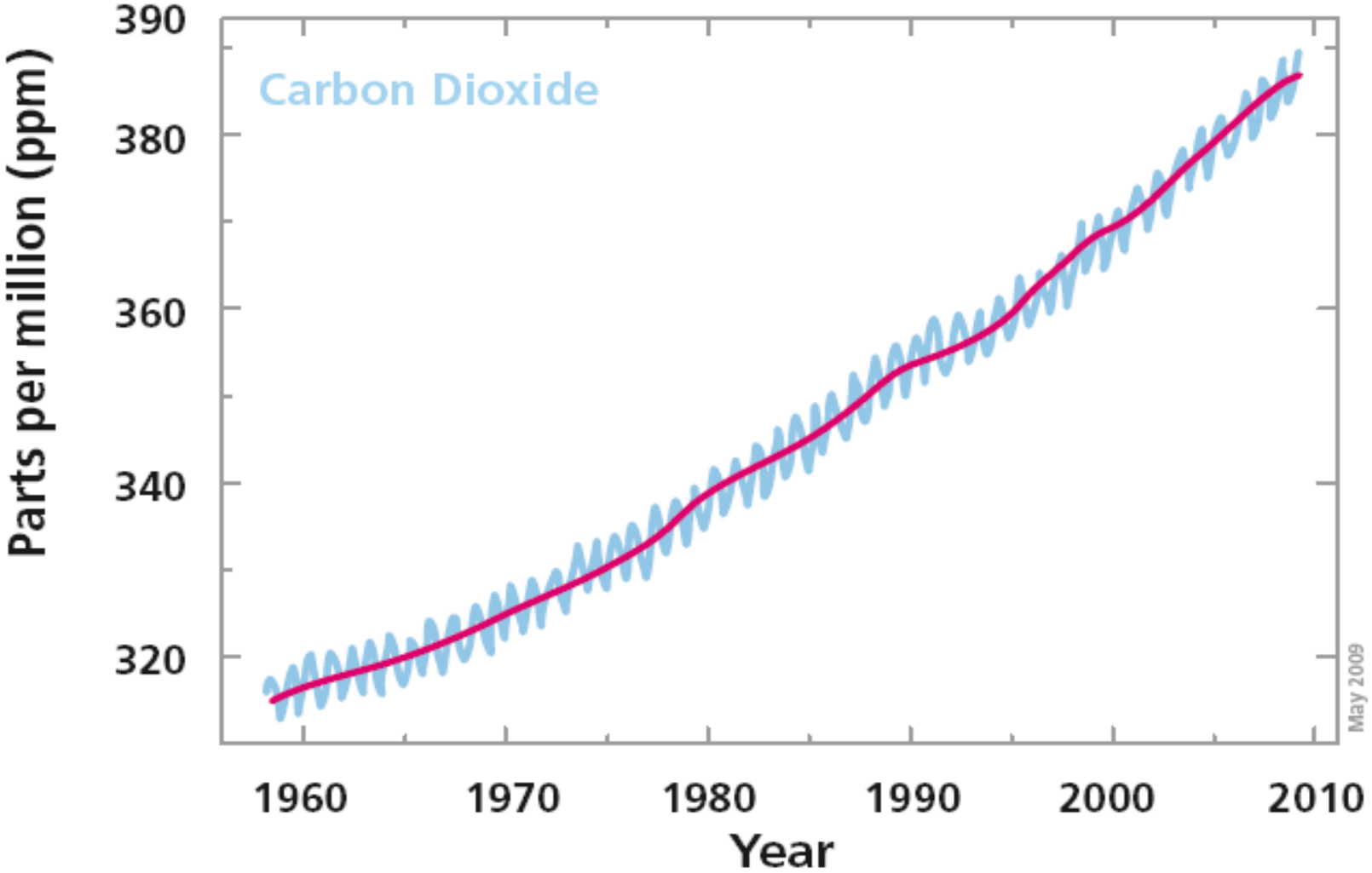


Fig. 1 – Andamento della concentrazione di anidride carbonica (CO_2) nell'atmosfera nell'ultimo cinquantennio; la netta ondulazione di periodo annuale è dovuta al ciclo stagionale dell'emisfero Nord, ricco di terre emerse e vegetazione, che assorbe la CO_2. (Da: ENEA "Rapporto Energia e Ambiente 2008" Luglio 2009).

L’aumento della anidride carbonica

Attualmente, la concentrazione di anidride carbonica sta crescendo di **oltre 2 ppm/anno**, e si avvicina alle 390 ppm.

Sulla curva di figura precedente si può notare **un certo rallentamento della crescita negli anni 1990**: è probabile che esso sia dovuto al **crollo del sistema sovietico**, con la chiusura di un gran numero di centrali ed impianti obsoleti ed inefficienti in URSS e nei paesi satelliti. Questa può essere considerata una prova **dell’origine antropica dei gas-serra** (oltre che della tragica riduzione del tenore di vita verificatasi in quei paesi nella nostra quasi totale indifferenza).

Il futuro della anidride carbonica

Le **correlazioni dinamiche tra le principali variabili climatologiche** sono essenzialmente **di tipo integrale**, cioè la variabile a valle è l'integrale di quella a monte, salvo la presenza di retroazioni stabilizzanti con costanti di tempo più o meno lunghe.

In base a queste correlazioni, **per una istantanea immissione (o sottrazione) di CO_2** nell'atmosfera, il **92%** è ancora presente (o rimosso) **dopo un anno**, il **64% dopo 10 anni**, il **34% dopo 100 anni**, ed il **19% dopo 1000 anni**.

Il futuro dell’effetto-serra

Appare quindi evidente come **l’effetto-serra**, se veramente esiste, **sia già “decollato”** con un andamento che è correlato all’”integrale” dell’incremento di concentrazioni di gas-serra già avvenuto rispetto ai tempi preindustriali. Questo **incremento è già molto notevole** (per l’anidride carbonica, da circa 275 a circa 390 ppm: **oltre il 40%**), e persisterà comunque in larga misura **per molti secoli**.

Tale incremento provocherà **un aumento della temperatura** dell’atmosfera non solo finché venisse bloccato, ma **finché non fosse del tutto eliminato** con il ritorno alle concentrazioni preindustriali.

Clima ed energia: possibili future dinamiche

Senza interventi attivi, il **ritorno alle concentrazioni preindustriali** mediante il ciclo del carbonio “naturale” non sarebbe possibile **neanche dopo un millennio**.

Se comunque, **mediante interventi attivi**, si ritornasse alle **concentrazioni preindustriali**, a quel punto **resterebbero poi da raffreddare l’atmosfera e soprattutto gli oceani** (evento quest’ultimo molto più arduo e lento, dato il loro enorme contenuto di calore).

Clima ed energia: le tendenze attuali

In realtà **le cose stanno andando molto peggio**, in quanto **non solo le concentrazioni, ma anche le emissioni** (al cui ”integrale” le concentrazioni sono a loro volta correlate) **continuano a crescere rapidamente**.

Basta considerare i paesi in via di rapido sviluppo come **Cina ed India** (ciascuno dei quali “pesa” come popolazione circa venti volte l’Italia), dove, a parte il volonteroso impegno nell’energia nucleare, **la quasi totalità delle nuove centrali elettriche è alimentata a carbone**, e dove **stanno per esplodere i trasporti privati su strada**.

La dinamica del sistema energetico globale

La **potenza utilizzata nel mondo** è oggi pari a circa **14 TW** (terawatt) (equivalenti, in potenza elettrica, a 14.000 grandi centrali), di cui **l'85% proviene da combustibili fossili**.

Questo è **il flusso vitale che alimenta la "civiltà industriale"** nel suo stadio attuale, la quale tuttavia come visto **riguarda soltanto una frazione minoritaria dell'umanità**.

La teoria di Tim Garrett (1/5)

Tim Garrett, professore dell'Università dello Utah, ha pubblicato sulla rivista Climatic Change un lavoro con cui, **in base ai dati della storia economica ed industriale degli ultimi decenni**, dimostra che **la "civiltà industriale" è assimilabile ad un organismo vivente** (v. figure seguenti): è come **un bambino**, che **cresce consumando cibo e, man mano che cresce, è in grado di consumare più cibo** per crescere ancora; **se il cibo scarseggia, il bimbo si ammala e può anche morire di fame**. Quanto più nutriente ed abbondante è il cibo, tanto più sano e forte crescerà il bambino.

Climatic Change (2011) 104:437–455
DOI 10.1007/s10584-009-9717-9

Are there basic physical constraints on future anthropogenic emissions of carbon dioxide?

Timothy J. Garrett

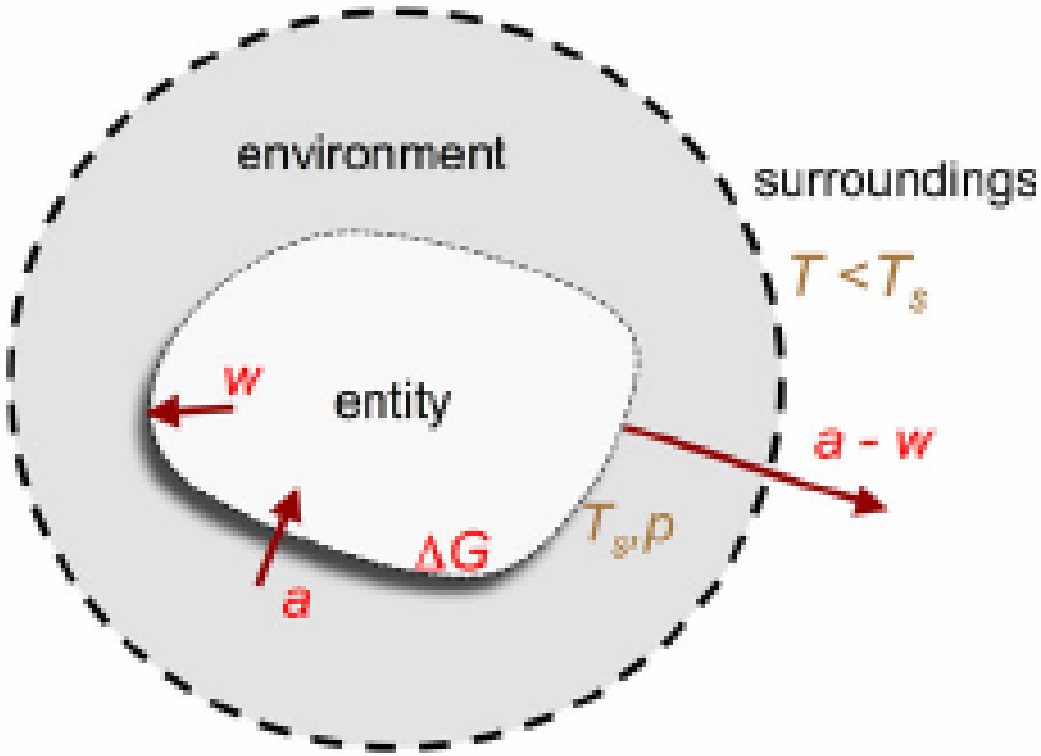


Fig. 1 Illustration of an evolving system bounding some entity and its environment, as separated by a permeable interface at constant temperature and pressure. The interface maintains an energy potential $\Delta G(T_s, p)$ so that the system as a whole is able to convert available energy at rate a into work w with efficiency $\varepsilon = w/a$, and "heat" at rate $a - w$. Heat is voided to the system's colder surroundings; work grows the interface at rate $w = d(\Delta G)/dt$. Because the interface potential is related to energy consumption through $a = \alpha \Delta G$, where α is an engine specific constant coefficient, what is defined is a positive feedback loop in which, through work, a and ΔG evolve logarithmically at rate $d \ln a/dt = d \ln(\Delta G)/dt = \eta = \varepsilon\alpha$. Here η can be considered a feedback efficiency or rate of return

Da: Timothy J. Garrett "Are there basic physical constraints on future anthropogenic emissions of carbon dioxide?" Climatic Change (2011) 104:437–455

La teoria di Tim Garrett (2/5)

Quindi, **nel corso dell'ultimo secolo** non è stata la quadruplicazione della popolazione mondiale a moltiplicare per 16 il consumo di energia, ma viceversa **è stata la capacità di sfruttare con crescente efficienza abbondanti nuove fonti energetiche a permettere una mai vista esplosione demografica ed economica**.

La teoria di Tim Garrett (3/5)

Tra noi fortunati **“pionieri” della civiltà industriale**, che siamo oggi una fase di recessione, si parla di **ritorno alla “frugalità”**, o addirittura di **“decrescita”**, come se il famoso “bambino” fosse ormai diventato adulto, o anche anziano: ma come stiamo vedendo, **decrescere non è facile**!

Ma non dimentichiamoci che **per i sei settimi dell’umanità il “bambino” è ancora in fasce**, ed ha bisogno di latte, pappe, ecc. in quantità mai viste. Di conseguenza **i consumi di energia a livello mondiale non potranno che crescere ancora per decenni**.

La teoria di Tim Garrett (4/5)

In questa prospettiva risulta anche evidente che **ulteriori miglioramenti dell'efficienza nell'uso dell'energia**, fortemente auspicati dagli ambientalisti, non farebbero che **favorire un più rapido sviluppo della "civiltà industriale".**

Non per niente **già nel 1865** W. Stanley Jevons, nel suo libro **"The Coal Question"**, sosteneva che l'introduzione di **motori a vapore perfezionati** avrebbe portato a sempre **maggiori consumi di energia**, fino ad un possibile esaurimento del carbone in Gran Bretagna...

La teoria di Tim Garrett (5/5)

Negli ultimi anni la produzione di energia era cresciuta di circa **il 2% all'anno**, e nonostante la attuale recessione (peraltro poco risentita nei grandi paesi in via di sviluppo) si ritiene che **prosegua a quel ritmo per molti anni ancora** (mentre il prodotto lordo mondiale potrà crescere anche più rapidamente, grazie alla riduzione della "intensità" energetica).

La teoria di Tim Garrett: conseguenze

Per **stabilizzare le emissioni di gas-serra**, quindi, occorrerebbe che **l'incremento di energia del 2% richiesto ogni anno venisse completamente fornito da fonti che non emettono carbonio**.

Per una **potenza utilizzata nel mondo che al 2015 potrà arrivare a 15 TW**, **il 2% equivale a 300 GW** (gigawatt).

Secondo gli "ambientalisti ideologici" (e molti politici al loro seguito), l'unica via accettabile per ridurre le emissioni sarebbe lo **sfruttamento delle energie rinnovabili**.

Le fonti energetiche rinnovabili (1/3)

Fonti energetiche rinnovabili sono le seguenti:

- biomasse,
- idraulica,
- solare termica, termodinamica e fotovoltaica,
- eolica,
- geotermica, ad alta e bassa entalpia,
- oceanica mareale, ondosa e termica.

Tutte le **sorgenti rinnovabili**, salvo la geotermica ad alta entalpia, soffrono all'origine di **ridottissime densità di potenza per unità di superficie**.

Le fonti energetiche rinnovabili (2/3)

Per l'energia **idraulica**, la **geotermica** e quella da **biomasse** da secoli l'uomo ha trovato, **previa concentrazione ed accumulo**, i modi per **uno sfruttamento conveniente**, almeno **in particolari situazioni geografiche ed economiche**.

Ma la **idroelettrica** è già largamente sfruttata almeno nei paesi sviluppati, ed un ulteriore sfruttamento, pure possibile anche sulle Alpi ed in Scandinavia, incontra a sua volta **l'opposizione degli ambientalisti**.

Le fonti energetiche rinnovabili (3/3)

Invece per le **“nuove rinnovabili”**, e cioè in particolare la **solare termica, termodinamica e fotovoltaica, e l’eolica**, la implementazione ingegneristica comporta **l’occupazione di vaste aree territoriali o marine**, e quindi:

- la costruzione e la gestione di **immense infrastrutture**, con l’utilizzo di **materiali anche pregiati** e di
- **una quantità di energia** che spesso è una frazione considerevole di quella producibile dall’impianto stesso in tutta la sua vita utile.

I vincoli per le rinnovabili “elettriche”

Per i **sistemi connessi alla rete elettrica**, occorre poi anche **assicurare la continuità del servizio**. Almeno **finché non verranno individuati efficaci sistemi di accumulo**:

- il contributo da fonti rinnovabili discontinue non potrà superare una **frazione (15-20%)** della potenza totale disponibile in rete;
- per ogni MWe nominale da queste fonti, dovrà essere installato **quasi un altro MWe da fonte “tradizionale”** a pronta risposta (idraulica o turbogas), tenuto pronto in riserva per il caso di **carenza di fonte** (es., sole o vento), e che necessariamente sarà **sottoutilizzato**!

L’opzione eolica (1/2)

La **eolica** mediamente ha un **fattore di carico intorno al 20%,** e quindi per stabilizzare le emissioni di CO_2, fornendo quei nuovi 300 GW medi sull’anno, occorrerebbe **ogni anno installare generatori eolici per 1500 GW** (cioè **1.500.000 torri da 1 MW**, alte un centinaio di metri; oppure, **300.000 torri da 5 MW**, alte duecento metri, come quelle in costruzione nel Mare del Nord, dove la Gran Bretagna, peraltro piena di buona volontà, ne vorrebbe costruire circa 6000, ma in un prospettiva di molti anni).

L’opzione eolica (2/2)

Essendo poi **il vento intermittente** e poco prevedibile, occorrerebbe installare **quasi altrettanta potenza elettrica convenzionale** (che emette carbonio), o costruire impianti che **accumulino grandi quantità di energia**.

Ad un costo di **6 miliardi di dollari per gigawatt per i generatori eolici e circa altrettanto per gli impianti di accumulo e le reti di connessione**, **l’investimento annuale** per stabilizzare le emissioni di gas-serra con l’energia eolica arriverebbe a **18.000 miliardi di dollari** (otto volte il prodotto interno lordo annuale dell’Italia).

L’opzione fotovoltaica (1/2)

Nel caso **dell’energia solare**, l’**investimento** richiesto per le infrastrutture di generazione sarebbe ancora **molto maggiore**, ma sorgerebbe anche un altro grave problema: **il forte fabbisogno energetico per la fabbricazione dei pannelli fotovoltaici**, infatti, comporterebbe che, ai previsti tassi di crescita delle installazioni di energia fotovoltaica, **tutta la potenza fotovoltaica via via installata nel mondo non sarebbe in grado di fornire l'energia (priva di emissioni di gas-serra) necessaria alla produzione annuale di nuovi pannelli fotovoltaici**.

L’opzione fotovoltaica (2/2)

Il **bilancio negativo per l’energia, e quindi per le emissioni di gas-serra**, tipico di una filiera fotovoltaica fortemente crescente, sembra permanere, anche nelle ipotesi migliori, **per diversi decenni**, e quindi oltre le scadenze critiche per la stabilizzazione del clima, a meno che **la gran parte dell’energia elettrica utilizzata non fosse fornita da fonti prive di emissioni** (idroelettrica, nucleare, **o la stessa fotovoltaica**; in quest’ultimo caso si potrebbe parlare di una **filiera “autofertilizzante”,** ma richiederebbe **tempi di realizzazione molto più lenti del necessario**).

La “bolla” fotovoltaica in Italia (1/2)

Il contatore fotovoltaico al 9 gennaio 2012

Totale conto energia
Impianti in esercizio: **321.143** Potenza (kW): **13.279.927** Costo annuo (€): **5.683.386.018**

Quarto conto energia	Terzo conto energia	Secondo conto energia	Primo conto energia
Impianti in esercizio: **74.031** Potenza (kW): **4.779.422** Costo annuo (€): **1.684.747.592**	Impianti in esercizio: **38.310** Potenza (kW): **1.546.022** Costo annuo (€): **640.007.739**	Impianti in esercizio: **203.068** Potenza (kW): **6.790.605** Costo annuo (€): **3.263.234.665**	Impianti in esercizio: **5.734** Potenza (kW): **163.878** Costo annuo (€): **95.396.022**

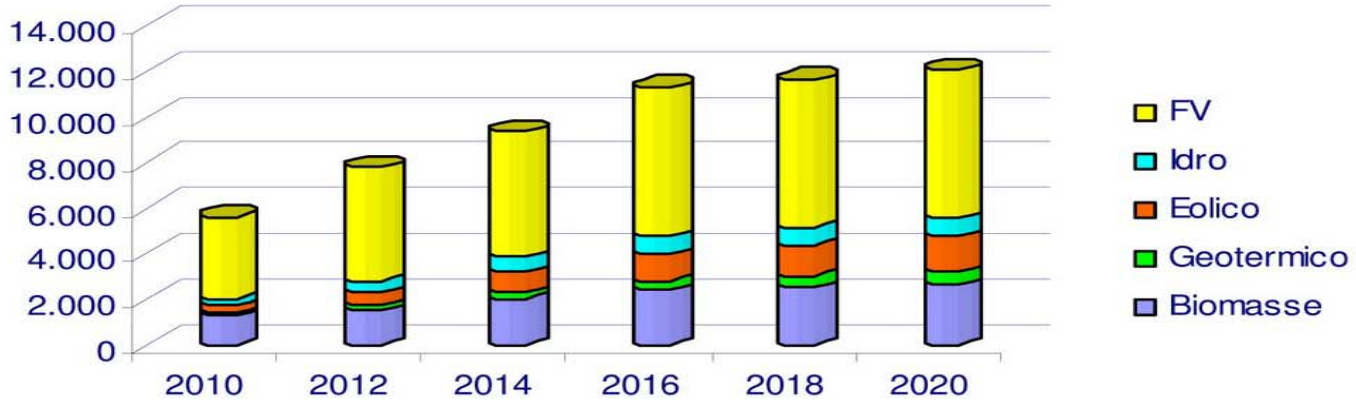
La “bolla” fotovoltaica in Italia (2/2)

FV: fotovoltaico; CV: certificati verdi (per eolico, ecc.).

Elettricità: stime 2010 costo fonti rinnovabili in base al PAN

(Piano d’Azione Nazionale per le energie)

Mln €

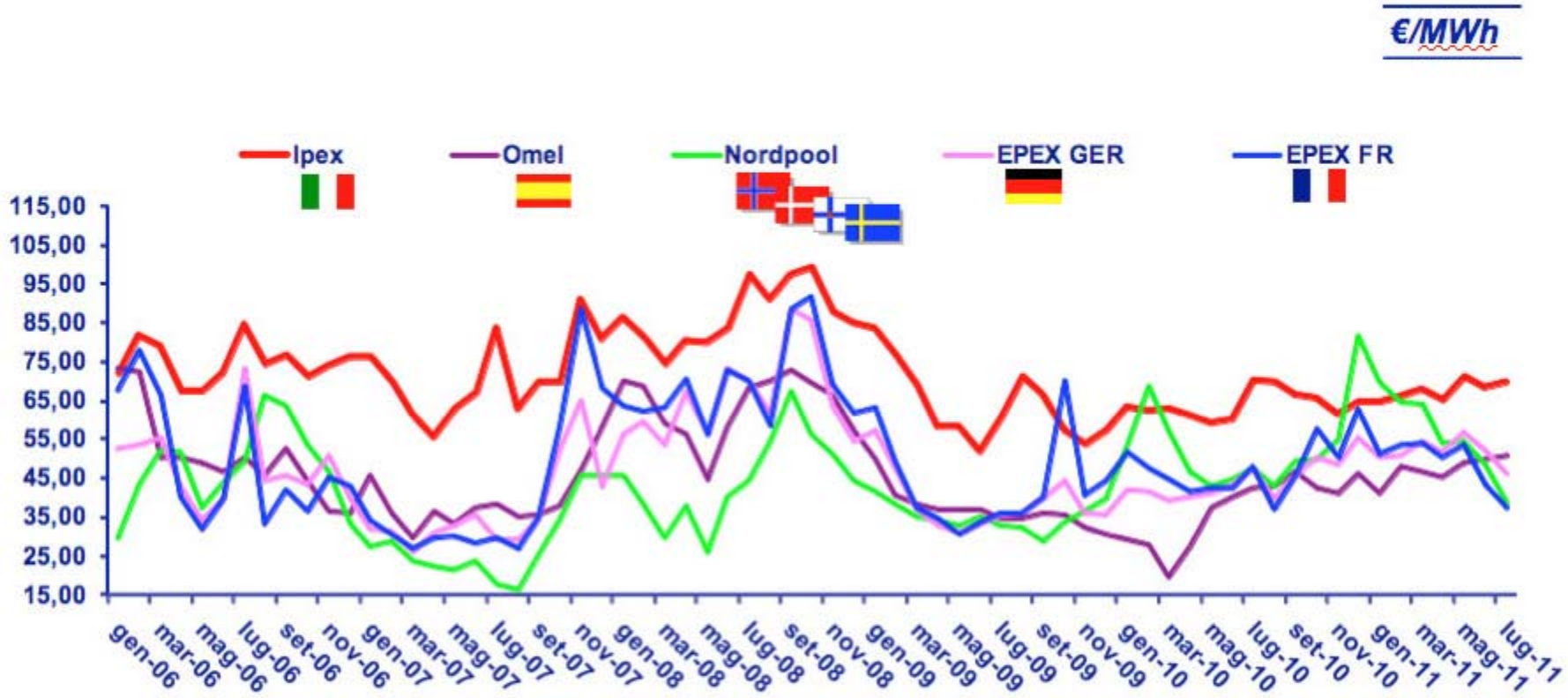


Stima costo incentivi						
Mln €	2010	2012	2014	2016	2018	2020
CV	2.002	2.788	3.849	4.807	5.164	5.558
FV	3.600	5.000	5.500	6.500	6.500	6.500
Totale	5.602	7.788	9.349	11.307	11.664	12.058
Stima domanda elettrica al netto autoconsumo*	295,1	305,8	317,0	328,9	344,6	360,0
CV su €/MWh	6,8	9,1	12,1	14,6	15,0	15,4
FV €/MWh	12,2	16,4	17,4	19,8	18,9	18,1
Tot FR su €/MWh	19,0	25,5	29,5	34,4	33,8	33,5

**Considerando la media dello scenario base e sviluppo di Terna al netto dell’autoconsumo (circa 30 TWh)*
Fonte: Elaborazioni Confindustria su dati Enea

Confronto prezzi mensili, *baseload*, delle principali borse elettriche europee

*2006 –2011**



* dati fino al 31 luglio 2011

Fonte: REF

L’opzione nucleare

Se si sceglie poi l’opzione nucleare, i **300 GW** senza emissioni da aggiungere ogni anno potrebbero essere forniti da **350 impianti da 1000 MWe** (megawatt elettrici), cioè da un GWe (gigawatt elettrico) ciascuno, per i quali è possibile un fattore di carico dell’85%. Se prodotti in serie, potrebbero costare **4 miliardi di dollari ciascuno**, per un investimento totale annuale di **1400 miliardi di dollari**, molto più abbordabile rispetto alle opzioni precedenti. Si tratterebbe comunque di mettere in servizio 350 grandi impianti nucleari ogni anno, cioè **circa uno al giorno ....**

Ma allora che fare?

Neanche l'opzione nucleare sembra in grado di **contribuire in modo risolutivo alla stabilizzazione delle emissioni** nei prossimi decenni.

Ma la sfida da affrontare appare ancora ben più impegnativa: se infatti l'obiettivo è quello di **evitare che l'incremento** della temperatura media superficiale del Pianeta **superi i 2°C** rispetto all'era preindustriale, secondo i climatologi occorrerebbe non solo "stabilizzare", ma **cominciare a "ridurre" le emissioni regolarmente del 3% all'anno a cominciare dal 2015**.

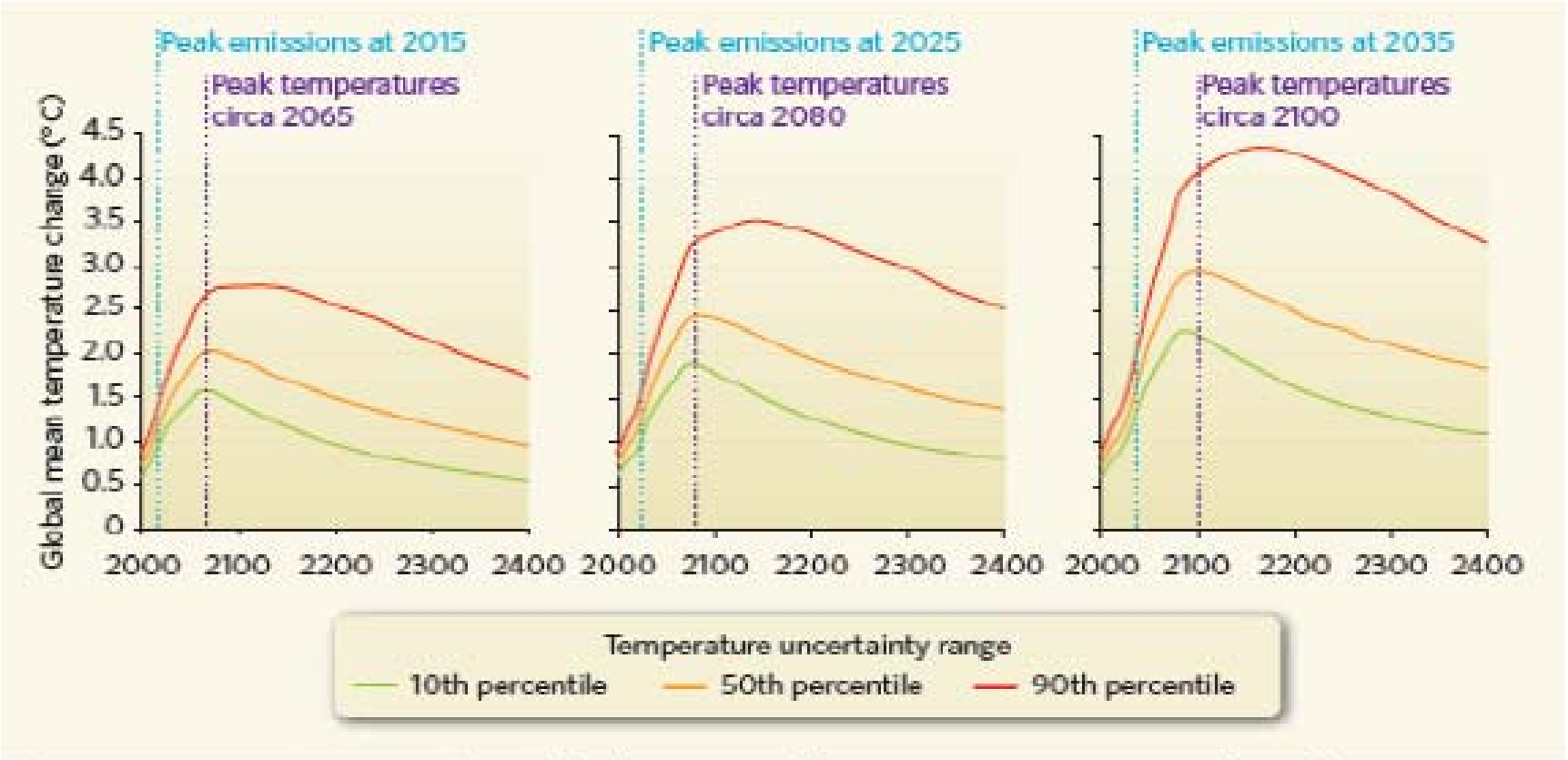


Figure 1 | Temperature scenarios. Global average surface temperature scenarios for peak emissions at three different dates (2015, 2025 and 2035) with 3%-per-year reductions in greenhouse-gas emissions.

Fig. 13 - Scenari fino all'anno 2400 della temperatura superficiale globale media, per diverse date di raggiungimento del picco delle emissioni, e nell'ipotesi che dopo il picco le emissioni vengano ridotte regolarmente del 3% all'anno. (Da: M. Parry et al. "Overshoot, adapt and recover" *Nature*, Vol. 458, pp. 1102-1103 - 30 April 2009).

Obiettivi utopici

Se non si vuole comprimere drasticamente le prospettive di miglioramento della qualità della vita anche nei paesi in via di sviluppo, sarebbe allora necessario **aggiungere ogni anno una produzione di energia, fornita da fonti che non emettono carbonio**, pari al 2% prima considerato più il 3% chiesto dai climatologi, cioè il 5% che, per una potenza utilizzata nel mondo di 15 TW al 2015, equivale a **750 GW**.

Il fabbisogno economico e le difficoltà logistiche e manifatturiere prima valutate per le diverse opzioni energetiche sarebbero quindi più che raddoppiate.

Speranze non realistiche

Da queste preoccupanti considerazioni appare chiara l'**"utopia" che sta alla base delle speranze dei climatologi** (e dei politici da essi indotti ad iniziative come i ripetuti convegni sui cambiamenti climatici).

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nel Synthesis Report del 4° Rapporto del Novembre 2007 affermava infatti:

*“There is **high agreement** and **much evidence** that all stabilisation levels assessed can be achieved by deployment of a portfolio of technologies that are either currently available or expected to be commercialised in coming decades, assuming appropriate and effective incentives are in place for development, acquisition, deployment and diffusion of technologies and addressing related barriers.”* (IPCC, 2007d).

(“Sussiste un *largo consenso* ed una *alta evidenza* che tutti i livelli di stabilizzazione considerati possono essere conseguiti mediante l’utilizzo di un portafoglio di tecnologie che sono attualmente disponibili, o che si prevede siano commercializzate nei prossimi decenni, supponendo che appropriati ed efficaci incentivi siano posti in essere per lo sviluppo, l’acquisizione, l’utilizzo e la diffusione delle tecnologie ed il superamento delle relative barriere”).

Commenti all'IPCC

Appare evidente che queste affermazioni **non tengono correttamente in conto** gli **ordini di grandezza** degli investimenti ed i **tempi richiesti** dalle necessarie realizzazioni logistiche ed industriali, né le conseguenti implicazioni socio-politiche.

I **cambiamenti** delle infrastrutture energetiche, infatti, dovranno essere tali non tanto dal punto di vista tecnologico, quanto dal punto di vista della loro **accettazione ed realizzazione su grande scala industriale in tutto il mondo**.

La storia delle fonti di energia

La storia dell'energia ci dice che **le nuove fonti penetrano nel mercato secondo classiche curve logistiche**, che risentono poco di guerre e crisi economiche, e che presentano una **"costante di tempo"** (tempo impiegato da una data fonte per passare dal 10% al 90% della sua penetrazione massima) dell'ordine degli **ottanta anni**.

Questa lunga "inerzia" è una evidente conseguenza dei lunghi tempi richiesti **dall'iter decisionale e dalla costruzione degli impianti**, e della **sempre crescente "vita utile"** prevista per gli impianti di nuova progettazione.

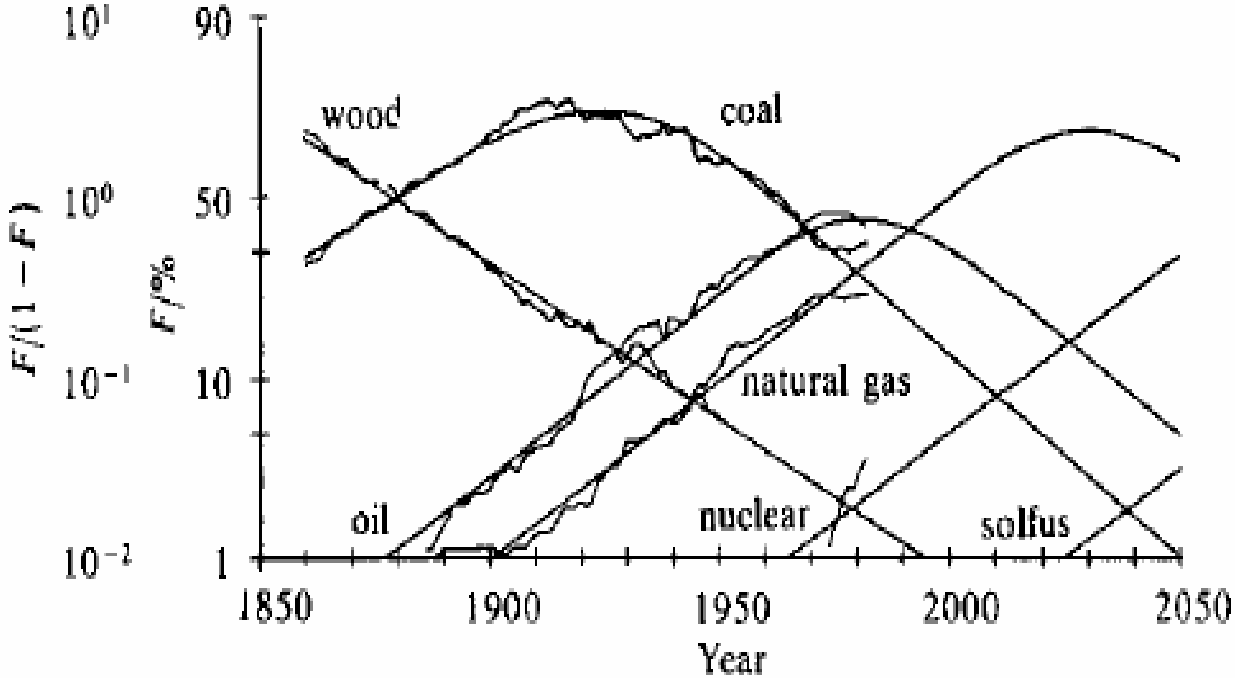


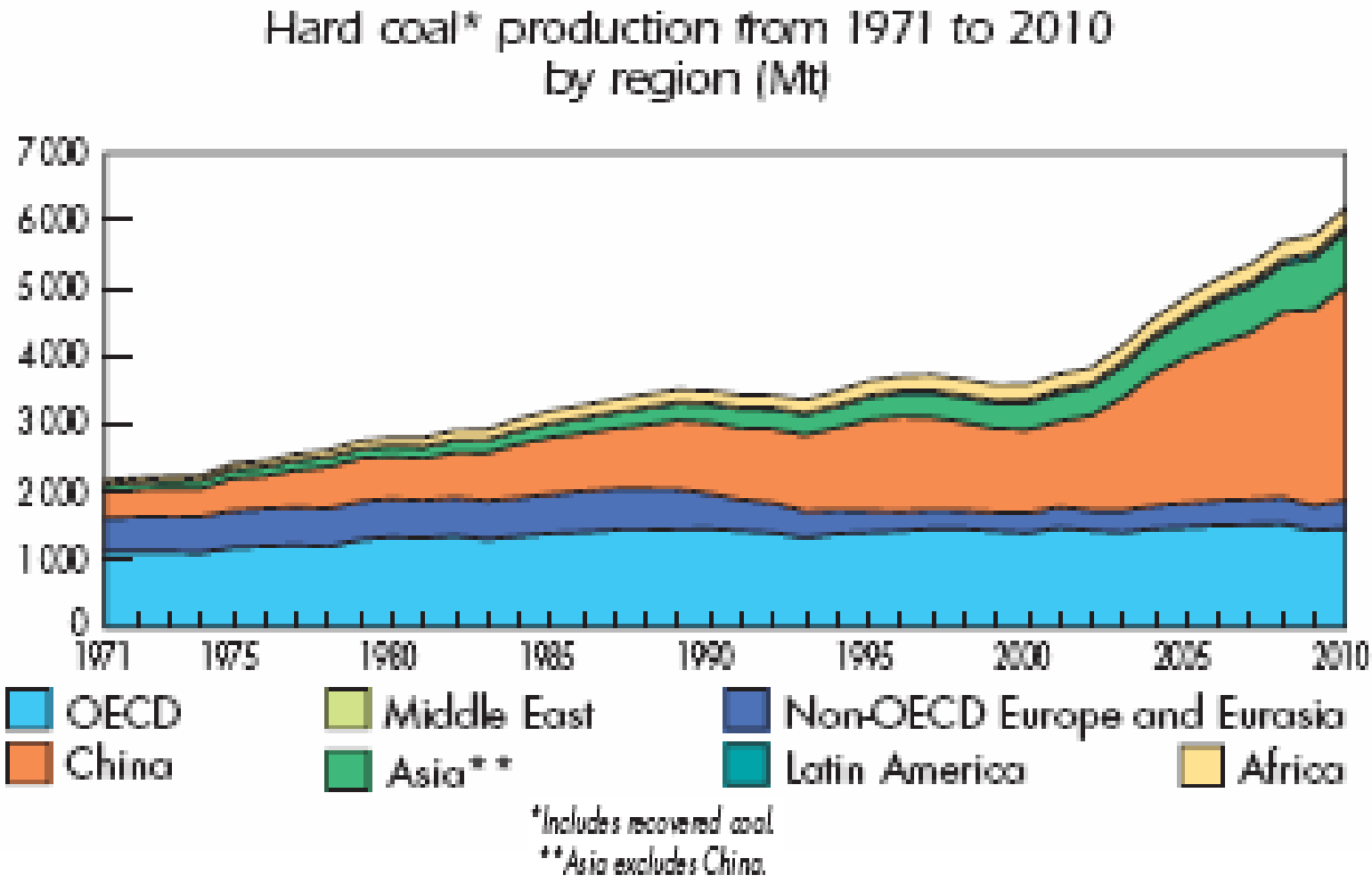
Figure 1. IIASA analysis of primary energy substitution at world level, originally done in 1974 and adjourned in 1984. A stable secular substitution, mapped with multiple substitution logistic analyses (smooth lines), is shown. The chart shows the market fraction (F) in energy terms. Starting about 1975, coal and natural gas proceed horizontally and show no substitution dynamics. This appears to be as a result of a set of laws and regulations forbidding the use of natural gas in power plants. These rules are now in a phase of relaxation and a surge of very efficient (up to 60%) natural gas power plants should be expected during the present decade and will, presumably, lead to a pickup in the use of natural gas and a drastic decrease of coal consumption. The solfus code (solar-fusion) is intended to include the possible use of solar energy, although the dilution and modulation of solar light makes it a poor candidate for large-scale energy production. Source: Marchetti and Nakićenović (1979).

L’evoluzione delle tecnologie energetiche

Da questa analisi risultava che **ogni grande ciclo economico** era caratterizzato dalla prevalenza relativa di una **nuova fonte di energia**: così, il massimo (relativo) di penetrazione del **carbone** si era verificato **negli anni ‘30** dello scorso secolo, quello del **petrolio** dovrebbe essere in corso **in questi anni**, mentre si può prevedere un massimo (relativo) di penetrazione del **gas naturale** per la **metà di questo secolo**.

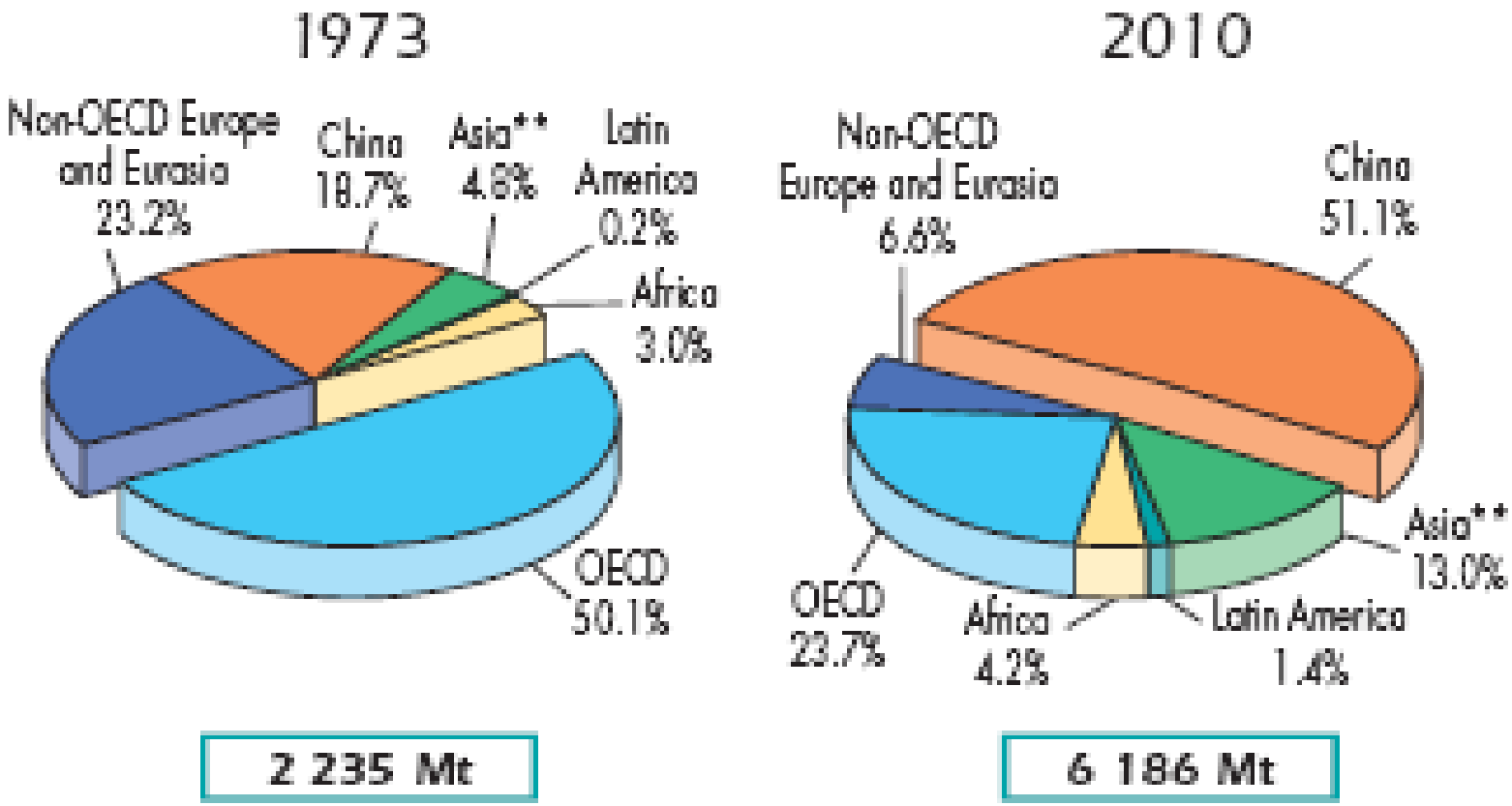
Questa analisi, tuttavia, fatta circa trent’anni fa con riferimento al contesto dei Paesi allora industrializzati, **appare oggi superata** dall’imprevisto, rapido **sviluppo dei già citati Paesi di nuova industrializzazione**.

Hard Coal Production



Da: "Key World EnergyStatistics 2011" International Energy Agency.

1973 and 2010 regional shares of hard coal* production



*Includes recovered coal.
**Asia excludes China.

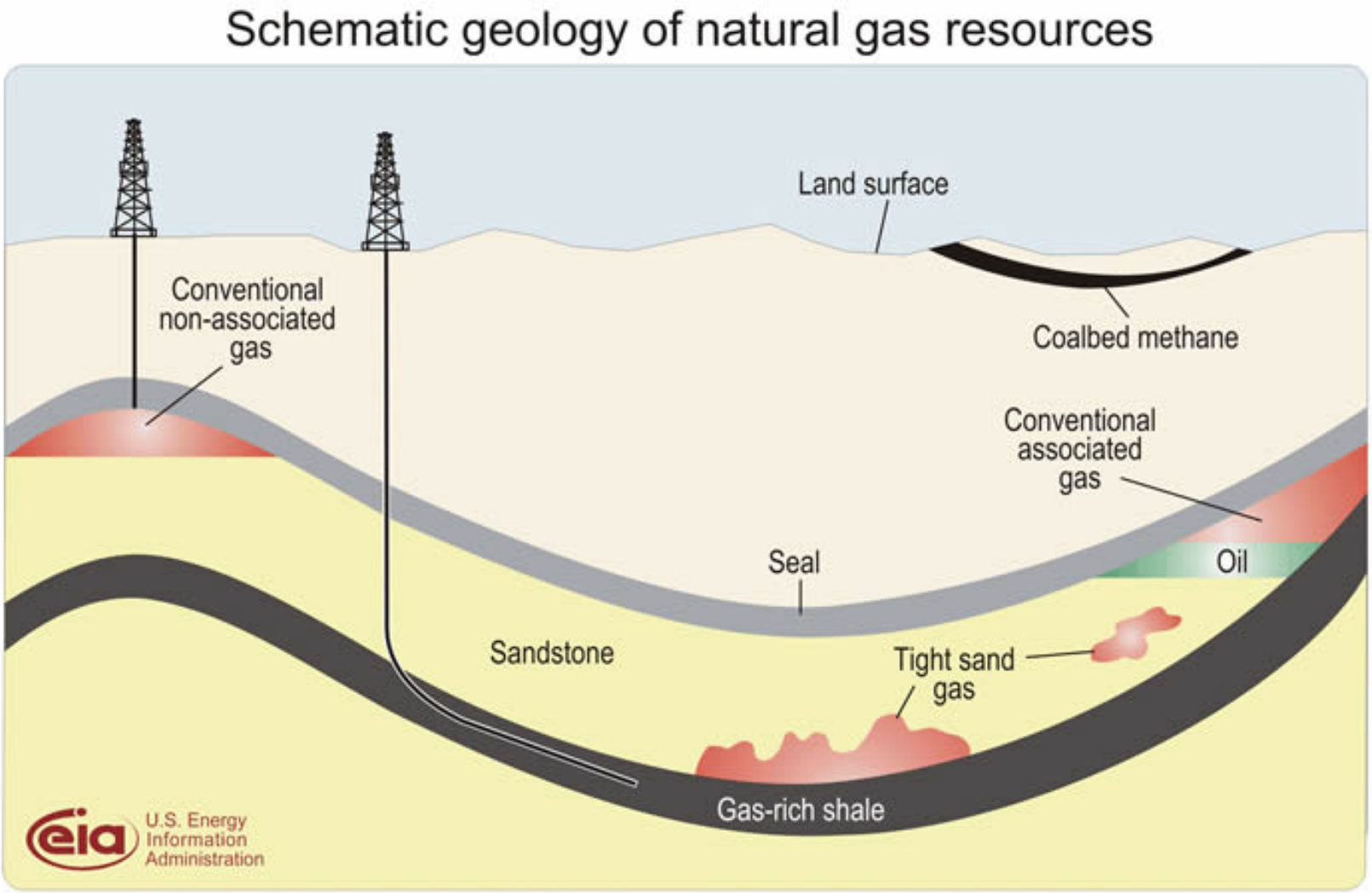
Da: "Key World EnergyStatistics 2011" International Energy Agency.

Una prospettiva realistica (1/3)

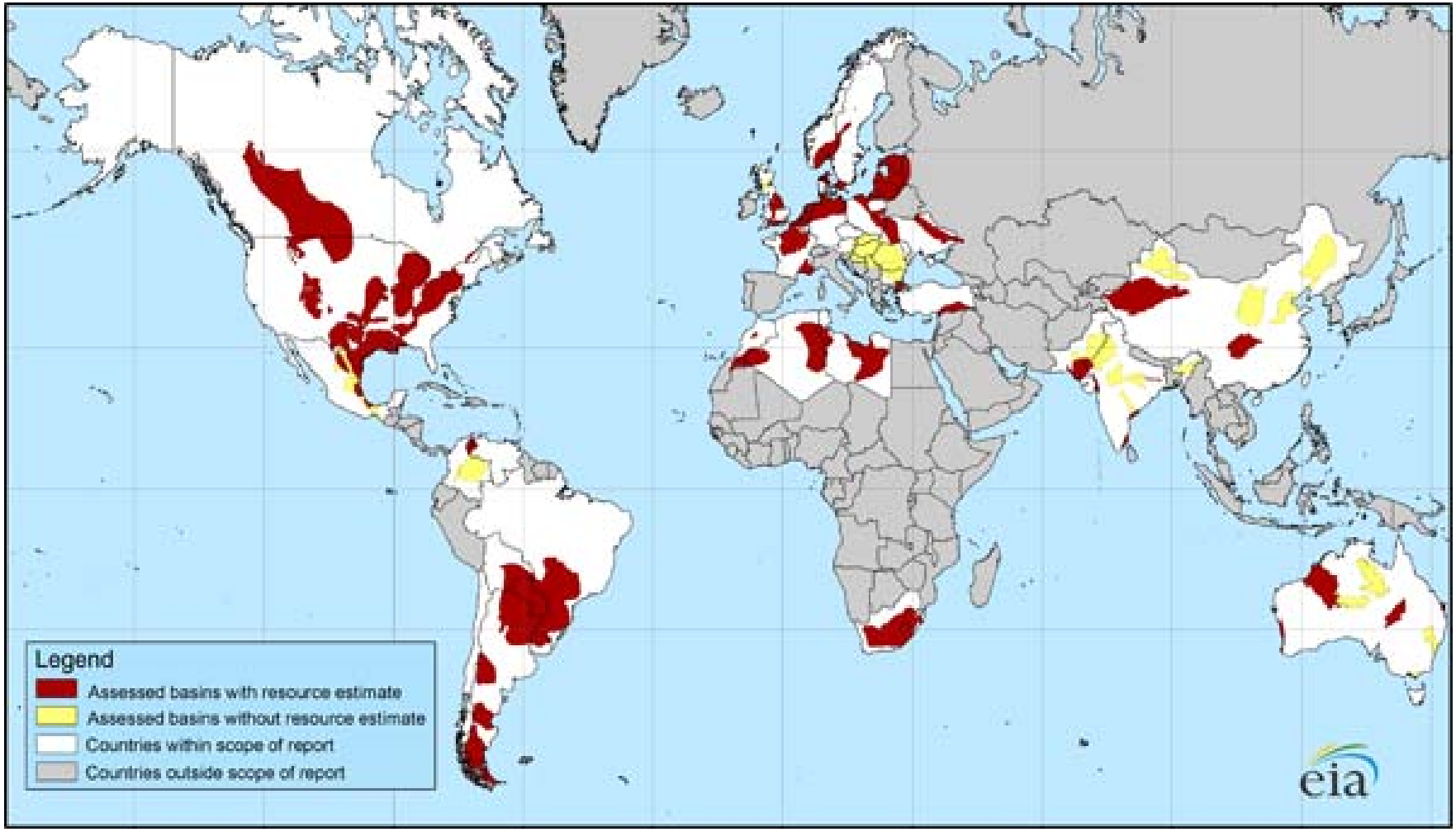
Non volendo ipotizzare catastrofi mondiali, **né ritenendo possibile** che decisioni autoritarie **riducano drasticamente e per decenni il livello economico e sociale raggiunto da molti paesi, anche di nuova industrializzazione**, appare **inevitabile che per molti decenni le fonti fossili saranno ancora preponderanti nella produzione di energia**.

Una prospettiva realistica (2/3)

L’unica opzione efficace **a breve termine** ed a costi accettabili per far fronte alla crisi climatica appare in pratica soltanto **la adozione su larga scala del gas naturale in luogo degli altri combustibili fossili** (tenuto conto anche della recente possibilità di sfruttare **enormi nuovi giacimenti** in strati di materiale scistoso e filoni carboniferi).



Da: http://it.wikipedia.org/wiki/File:GasDepositDiagram.jpg



Da: http://it.wikipedia.org/wiki/File:EIA_World_Shale_Gas_Map.png

Una prospettiva realistica (3/3)

Dovrebbe essere invece immediatamente **bloccata la costruzione di nuove centrali a carbone** (che, oltre alla **CO_2**, emettono **polveri sottili** e dannosi metalli pesanti, come il **mercurio**, nonché **uranio e torio**, che oggi sono la principale fonte antropica di inquinamento radioattivo!).

Così **nei trasporti** dovrebbero essere promossi i **veicoli a metano**, anche per il trasporto merci (**la Fiat è pioniera in questo settore**, e, tramite la Chrysler, potrebbe diffondere a breve questa tecnologia anche negli Stati Uniti).

Confronto tra le alternative: CCS (1/2)

Degli attuali **14 TW** utilizzati nel mondo, almeno **10 sono prodotti da fonti fossili**, che **in un anno** immettono nell'atmosfera **26 miliardi di tonnellate (Gt) di CO_2**.

Una opzione che sembrerebbe banale, e che viene fortemente proposta dai fautori delle fonti fossili, specie del carbone, sarebbe **la cattura e il sequestro della CO_2 prodotta** (Carbon Capture and Sequestration: **CCS**): ciò significherebbe catturare e sequestrare **26 Gt di CO_2 all'anno**.

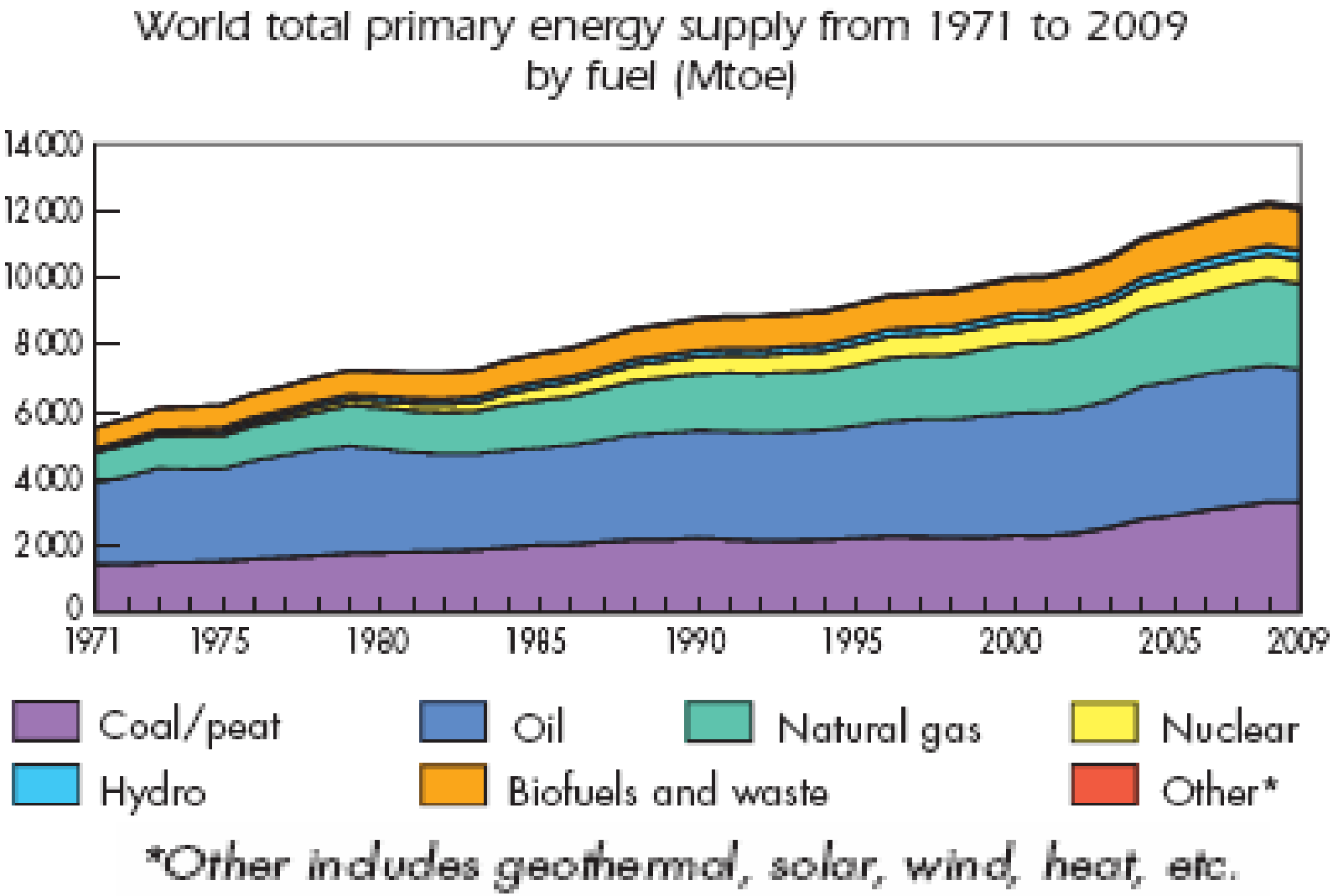
Se la CO_2 viene liquefatta (densità 0,47 kg/l), si tratterebbe di **sistemarne 26/0,47 = 55 miliardi di metri cubi all'anno**!

Confronto tra le alternative: CCS (2/2)

Tutto il petrolio estratto oggi in un anno (circa 4 Gt) ha un volume che non è più del 10% del precedente. Per attuare **su larga scala la CCS**, quindi, accorrerebbe realizzare e gestire una **infrastruttura** di pozzi, tubazioni e stazioni di pompaggio **10 volte** più vasta di quella attualmente in opera per **l'utilizzo del petrolio** (realizzate nel corso di oltre un secolo).

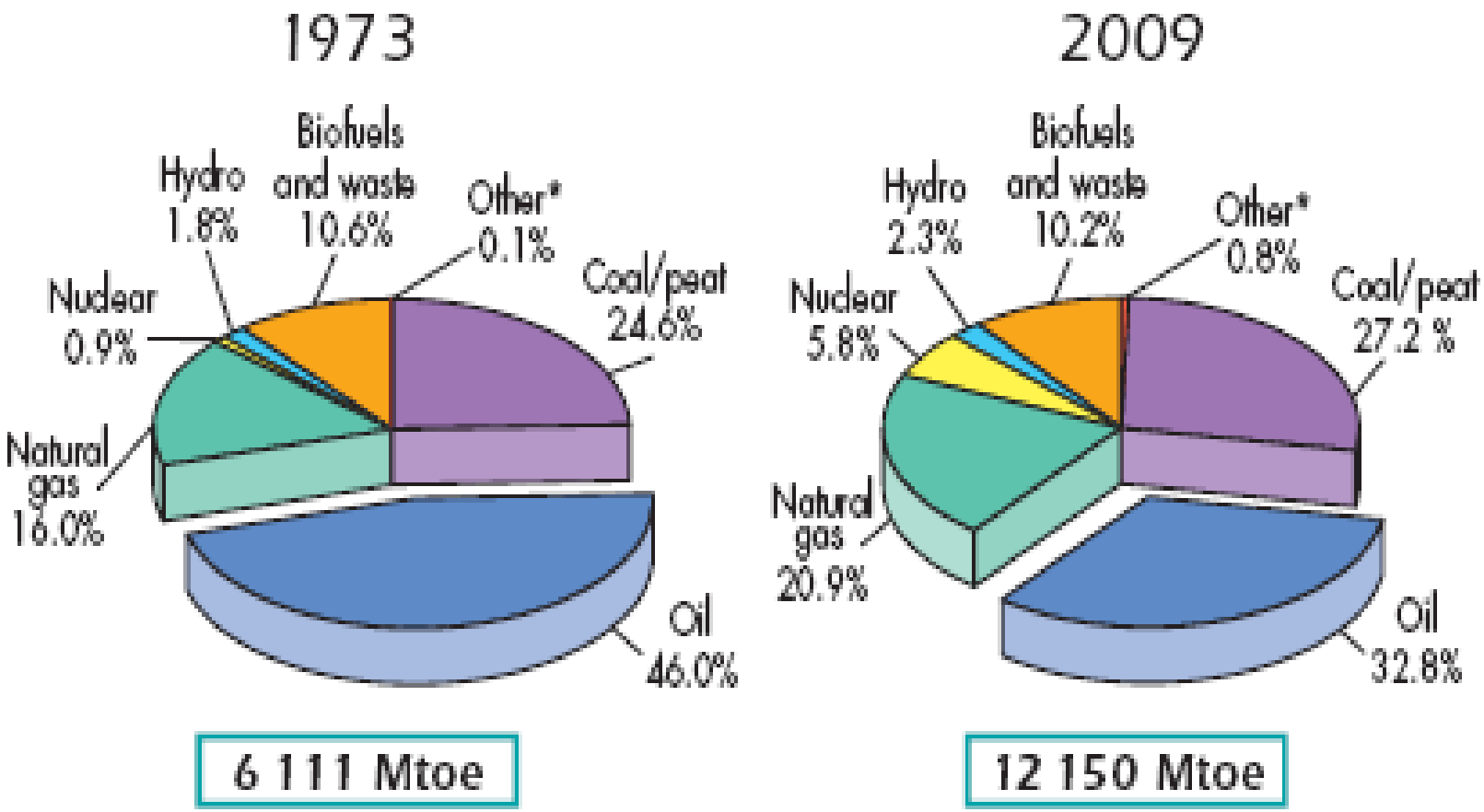
Inoltre, con la CCS, a pari prestazioni energetiche finali, è necessario **consumare fino al 40% in più di energia primaria**. Infine, è per ora **malnoto l'impatto sull'ambiente** relativo alla stabilità ed alla azione fisico-chimica dei depositi artificiali di CO_2.

World



Da: "Key World EnergyStatistics 2011" International Energy Agency.

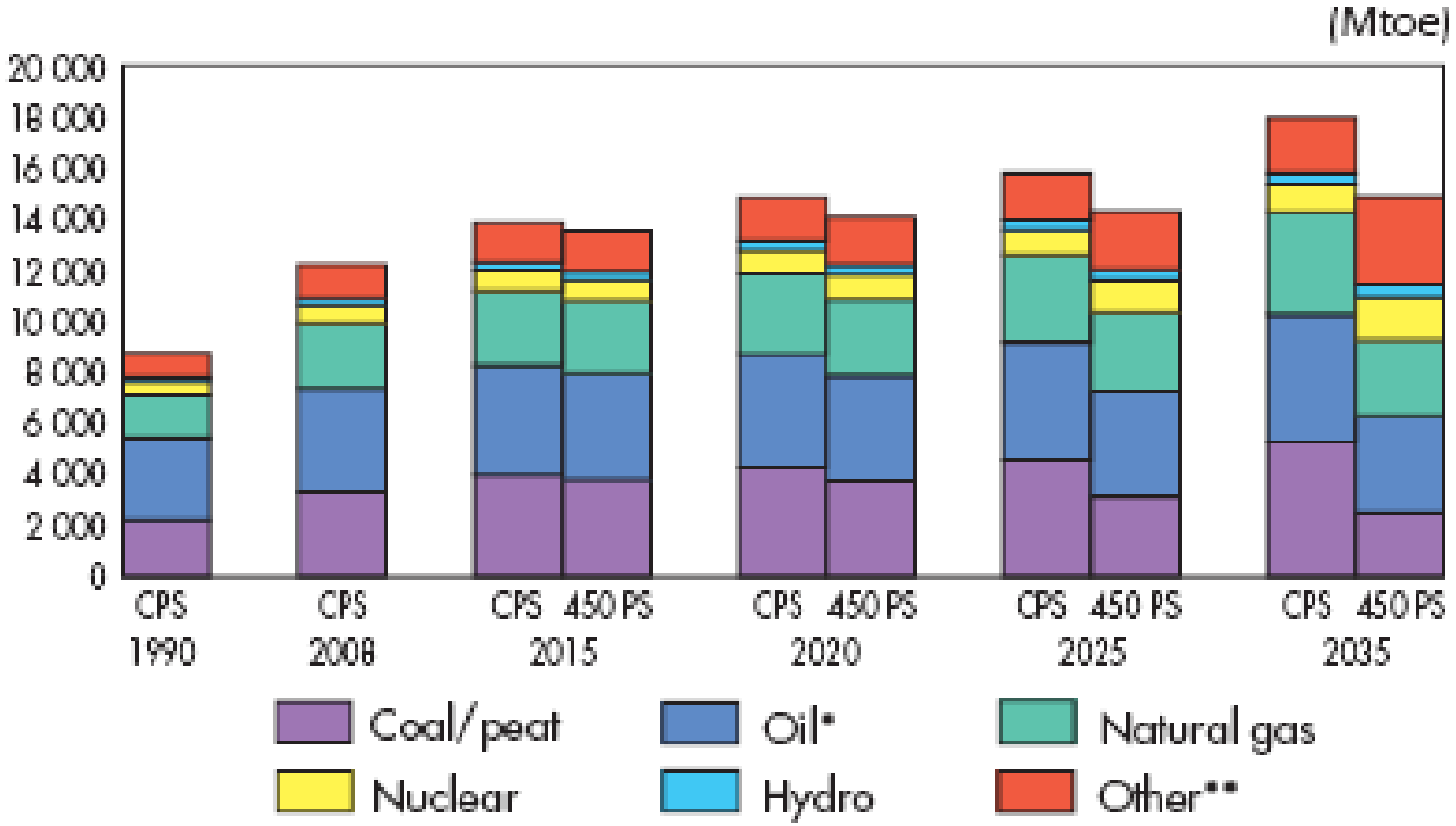
1973 and 2009 fuel shares of TPES



*Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

Da: "Key World EnergyStatistics 2011" International Energy Agency.

TPES Outlook by Fuel



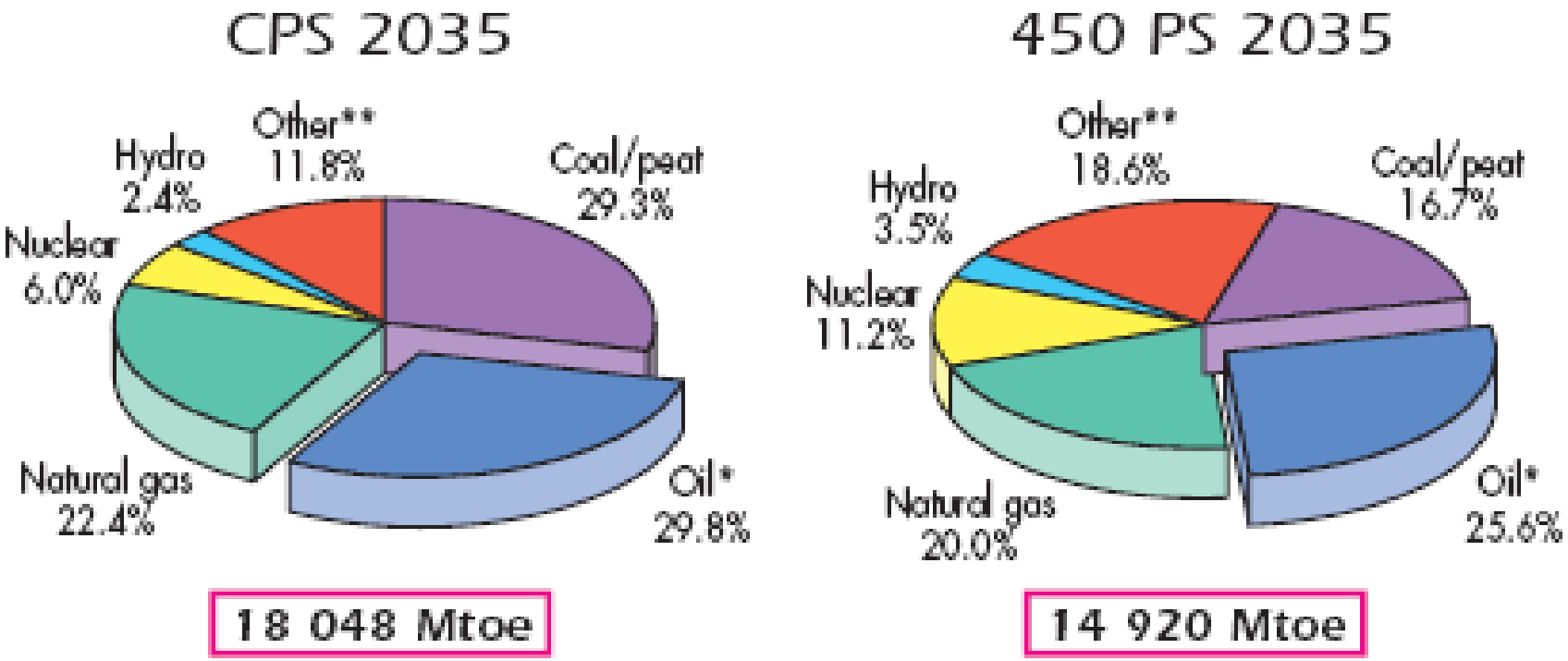
CPS: Current Policy Scenario (based on current policies)

*450 PS: 450 Policy Scenario*** (based on policies under consideration)*

**Includes international aviation and international marine bunkers.*
***Other includes biofuels and waste, geothermal, solar, wind, tide, etc.*
****Based on a plausible post-2012 climate-policy framework to stabilise the concentration of global greenhouse gases at 450 ppm CO_2-equivalent.*

Da: "Key World EnergyStatistics 2011" International Energy Agency.

Fuel shares of TPES in 2035 for Current Policy Scenario and 450 Policy Scenario



*Includes international aviation and international marine bunkers.
**Other includes biofuels and waste, geothermal, solar, wind, tide, etc.
***Based on a plausible post-2012 climate-policy framework to stabilise the concentration of global greenhouse gases at 450 ppm CO_2-equivalent.

Da: "Key World EnergyStatistics 2011" International Energy Agency.

Tavola 2 – Quota delle fonti rinnovabili sulla domanda totale di energia

	1990	2009	2035 Current Policies	2035 New Policies	2035 450
Carbone	**26**	**27**	**30**	**24**	**16**
Petrolio	**37**	**33**	**27**	**27**	**25**
Gas	**19**	**21**	**23**	**23**	**22**
Nucleare	**6**	**6**	**6**	**7**	**11**
Idroelettrico	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**
Biomassa	**10**	**10**	**9**	**11**	**16**
Altre rinnovabili	**0**	**1**	**3**	**4**	**8**

Fonte IEA, WEO 2011

Da: “Nihil sub sole novum: l’eterna primavera del carbonio” di Enzo Di Giulio (Eni Corporate University - Scuola Enrico Mattei) – AGI Energia, 16 novembre 2011:

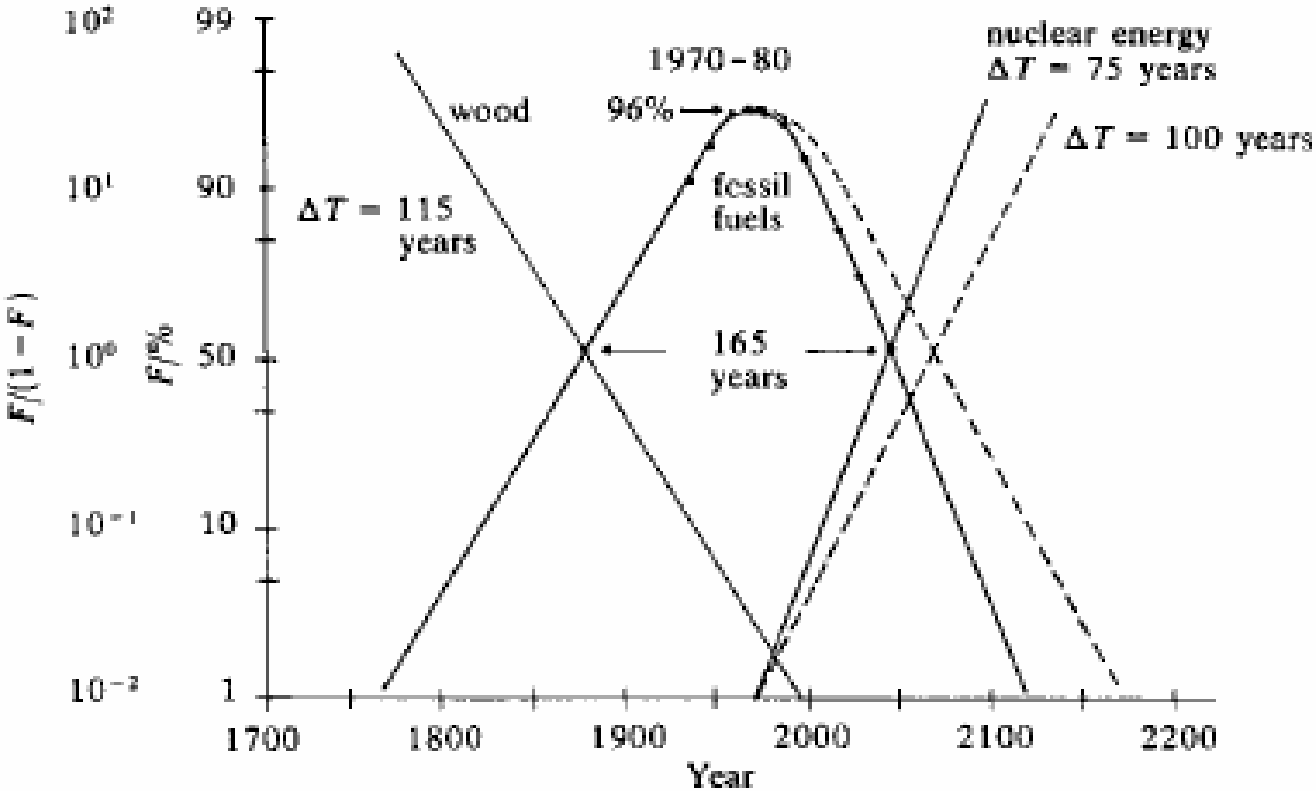


Figure 14. The amount of fossil fuels counted as market shares in figure 1 can be combined to construct the fossil-fuel grand substitution. The only parameter which is open to speculation is the long-term rate of penetration of nuclear energy. The regularities in the penetration time constants of coal, oil, and gas would point to a penetration constant for nuclear energy of around 80 years. Until a more stringent logic to restrict the range of this parameter is known, two values are given, with time constants of 75 years and 100 years. In both cases the time left for fossil fuels to end their cycle will be around 150 years. The total cycle time should be of the order of 350 to 400 years. Source: Marchetti (1988).

Center for
Advanced Nuclear Energy Systems
Massachusetts Institute of Technology
77 Massachusetts Avenue, 24-215
Cambridge, MA 02139-4307
(617) 452 3560
canes@mit.edu
mit.edu/canes

Nuclear Energy and Sustainability Program

Nuclear Energy for Variable Electricity and Liquid Fuels Production: Integrating Nuclear with Renewables, Fossil Fuels, and Biomass for a Low-Carbon World

Charles W. Forsberg

MIT-NES-TR-015
September 2011

EXECUTIVE SUMMARY

The world faces two energy challenges: (1) the national security and economic challenge of dependence on foreign oil and (2) the need to reduce carbon dioxide emissions from the burning of fossil fuels to avoid climate change. Nuclear energy as a low-carbon domestic source of energy can address both challenges. However, nuclear energy in the United States is only used for base-load electricity production—about a quarter of the total energy demand. To address the two energy challenges, we have initiated a series of studies to understand long-term nuclear-renewable energy futures for a low-carbon world that can meet all energy demands. This includes liquid fossil fuel options with low greenhouse gas releases. This is a first effort to synthesize what has been learned about hybrid energy systems.

The electricity challenge is to provide variable electricity production to match demand. Today this is primarily accomplished with variable-load fossil plants burning stored coal, oil, and natural gas. It is an economic option because of the low cost of storing fossil fuels and the relatively low cost of fossil power plants. The output of nuclear and renewable electricity sources do not match electricity demand. In a low-carbon world it would be required to store electricity when excess electricity is available to meet demand at times of low electricity production.

If there are restrictions on carbon dioxide emissions, economics favors nuclear for most electricity production unless renewable electricity production costs are significantly lower than nuclear electricity production costs. This is because the amount of electricity that has to be stored to match electricity production with demand is much smaller in an all-nuclear system than any renewable system[1]. About two-thirds of all electricity demand is base-load electricity where the steady-state electricity output of a nuclear plant matches customer demand.

While there are many electricity storage technologies to help match electricity production with demand over a period of a day (smart grid, pumped hydroelectric storage, batteries, etc.), only two seasonal energy storage technologies were identified[2]: nuclear geothermal heat storage and hydrogen. A nuclear renewables electricity system that also produces hydrogen for industrial markets may enable an economic system for variable electricity production where a larger fraction of the electricity can be produced by wind and solar energy sources.

Nuclear energy can reduce greenhouse emissions from gasoline, diesel and jet fuel by replacing fossil fuels used in the production and refining processes. In the context of increasing U.S. oil production, a primary need is for heat to recover heavy oil and shale oil. U.S. shale oil resources exceed total oil produced worldwide to date and thus their use could eliminate U.S. dependence on foreign oil. The recovery and conversion of shale oil into liquid fuels using heat from nuclear reactors may have the lowest carbon dioxide releases per liter of fuel of all the fossil fuel alternatives to conventional crude oil production.

---

[1] Solar output follows the seasons, high in summer and low in winter. Wind at the latitudes of the United States is strongest in the spring and weakest in the summer. Consequently, energy storage costs can drive electricity costs.

[2] In a nuclear geothermal system at times of low electricity demand, nuclear heat is used to heat a 500-m cube of rock a kilometer underground to create an artificial geothermal heat source. That heat source powers a variable-output geothermal power plant. With excess electricity hydrogen can be produced to meet refinery and industrial demands for hydrogen or peak electricity production.

,,,continua

Unlike almost all other industrial processes, shale oil and heavy oil production do not require steady-state heat input. That characteristic would allow nuclear plants coupled to shale oil and heavy oil production to operate at base-load with variable heat and electricity production. The variable electricity production could help match electricity production to demand and enable the larger-scale use of renewables. Heavy oil and shale oil production are the only potential industries large enough where variable heat demand is the alternative to energy storage to match electricity production with demand. Very little research has been done on these options.

There is the potential for nuclear biofuels to supply a major fraction of the liquid fuels demand. This option results in no net addition of greenhouse gases to the atmosphere. Liquid fuels from biomass are limited by the availability of biomass. Synergisms between nuclear and biofuels can enable up to three times as much liquid fuel to be produced per ton of biomass. This is achieved by using nuclear to provide heat and hydrogen to operate the biorefinery and thus avoid the use of biomass as a fuel for the biorefinery. Liquid fuels can also be made from air and water with heat and electricity from nuclear power plants. This option can provide unlimited liquid fuel and places an upper cap on the cost of liquid fuels—2 to 3 times that of the cost of electricity on a unit heat basis.

Key enabling technologies for a low-carbon nuclear-renewable energy system include nuclear-geothermal gigawatt-year energy storage, high-temperature electrolysis for hydrogen production, use of nuclear heat for reservoir heating of heavy oils and shale oil, conversion of lignin (the non-cellulosic component of plants) to liquid fuels, and densification of biomass for economic transport of biomass to large biorefineries. Most applications can be met with light water reactors; but some applications require the commercialization of high-temperature reactors.

A nuclear renewables energy future is possible and potentially economic. Nuclear and renewable energy sources have different characteristics and in some systems are synergistic. All-nuclear or all-renewables energy futures are more expensive and difficult to achieve. Wind and solar economics are strongly dependent on location—particularly latitude because (1) it drives variable seasonal energy demands and (2) wind and solar inputs are functions of latitude. The analysis herein is for the United States but would be generally applicable for countries at similar or higher latitudes.[3] Little work has been done to develop credible low-carbon energy futures for a prosperous world of 10-billion people. The uncertainties are very large.

[3] Latitude drives the seasonal energy demand, wind resources, and solar resources. An analysis of a location such as the dry, near equatorial, high-elevation deserts of Chile might have very different conclusions. Near-constant year-round weather reduces variations in energy demand. The combination of low humidity, no clouds, and high elevations implies reduced light absorbed in the atmosphere and more solar flux for solar systems. Near the equator implies small variations in solar flux over a year.

Sintesi del Rapporto MIT-NES-TR015 (1/5)

Obiettivo: verso **un mondo a basso tenore di carbonio**.

Opzioni energetiche che assicurino:

- **energia elettrica**, ma anche
- **combustibili e carburanti**;
- **ridotte o nulle emissioni di carbonio**, ma anche
- **sicurezza ed autonomia energetica**.

Si considerano:

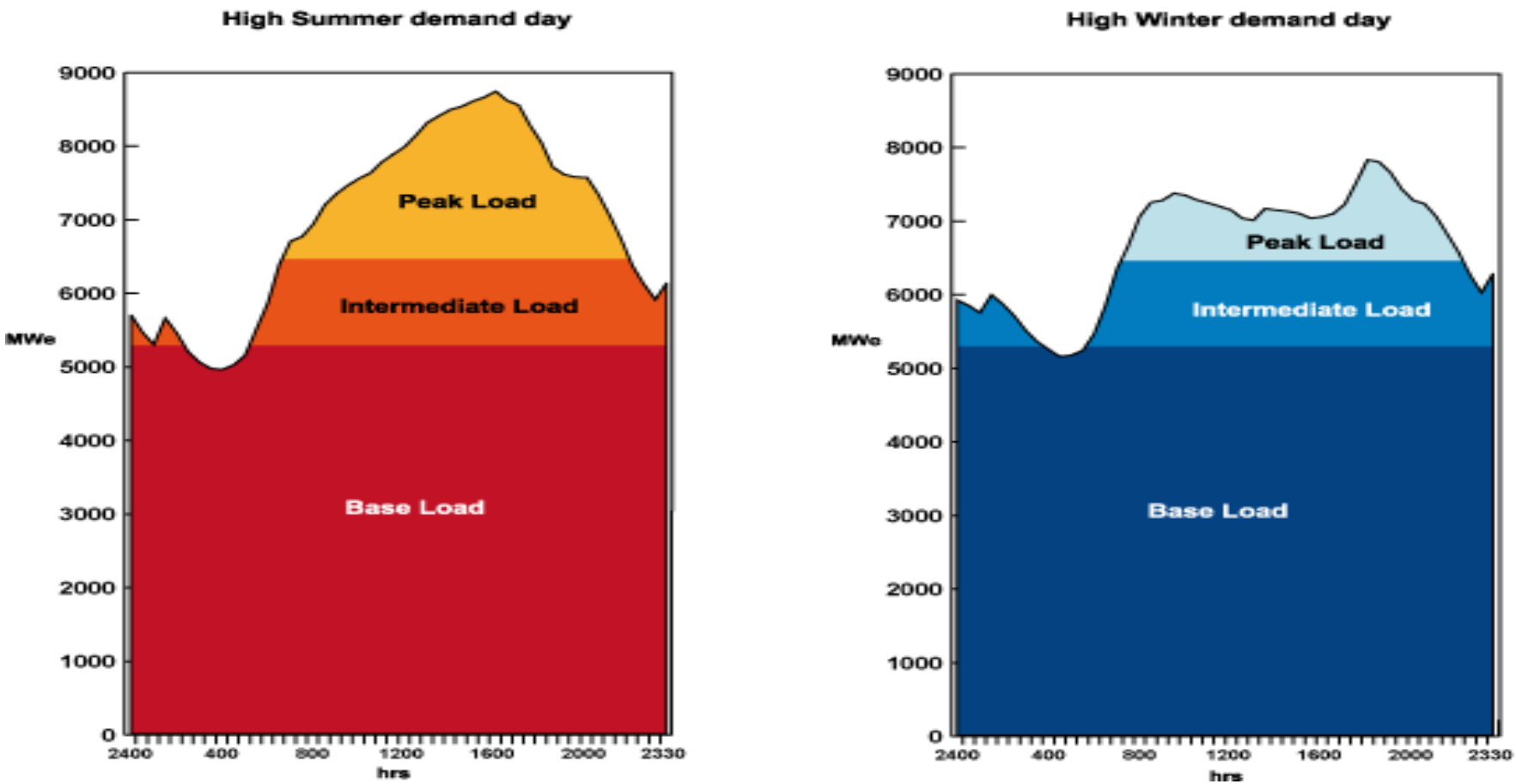
- la **nucleare**, come fonte sia di **elettricità** che di **calore**;
- le **rinnovabili elettriche**, anche quelle non programmabili;
- le **biomasse**.

Sintesi del Rapporto MIT-NES-TR015 (2/5)

Vincoli operativi: sia la fonte **nucleare**, sia le **rinnovabili elettriche**, richiedono **elevati investimenti nell'impianto**, mentre **i costi di gestione sono molto ridotti**; allora:

- gli **impianti nucleari** dovranno lavorare **"a tavoletta"**;
- gli impianti per le **rinnovabili elettriche non programmabili** (eolici, solari) dovranno poter immettere in rete **tutta l'energia offerta momento per momento dagli eventi naturali**.

Load curves for Typical electricity grid



This diagram shows that much of the electricity demand is in fact for continuous 24/7 supply (base-load), while some is for a lesser amount of predictable supply for about three quarters of the day, and less still for variable peak demand up to half of the time.

(V. traduzione alla tavola seguente).

Da: WNA "World Energy Needs and Nuclear Power *(September 2009).*

(Traduzione da tavola precedente)

Load curves for Typical electricity grid: ***curve di carico per una tipica rete elettrica****.*

High Summer demand day: *giornata di alta richiesta estiva.*

High Winter demand day: *giornata di alta richiesta invernale.*

Peak Load: *carico di picco.*

Intermediate Load: *carico intermedio.*

Base Load: *carico di base.*

Questo diagramma dimostra che la gran parte della richiesta di elettricità riguarda il "carico di base" (una fornitura continuativa, 24 ore al giorno per 7 giorni alla settimana), mentre un'altra parte riguarda una fornitura prevedibile per circa tre quarti della giornata, ed una parte minore riguarda picchi variabili per circa metà della giornata.

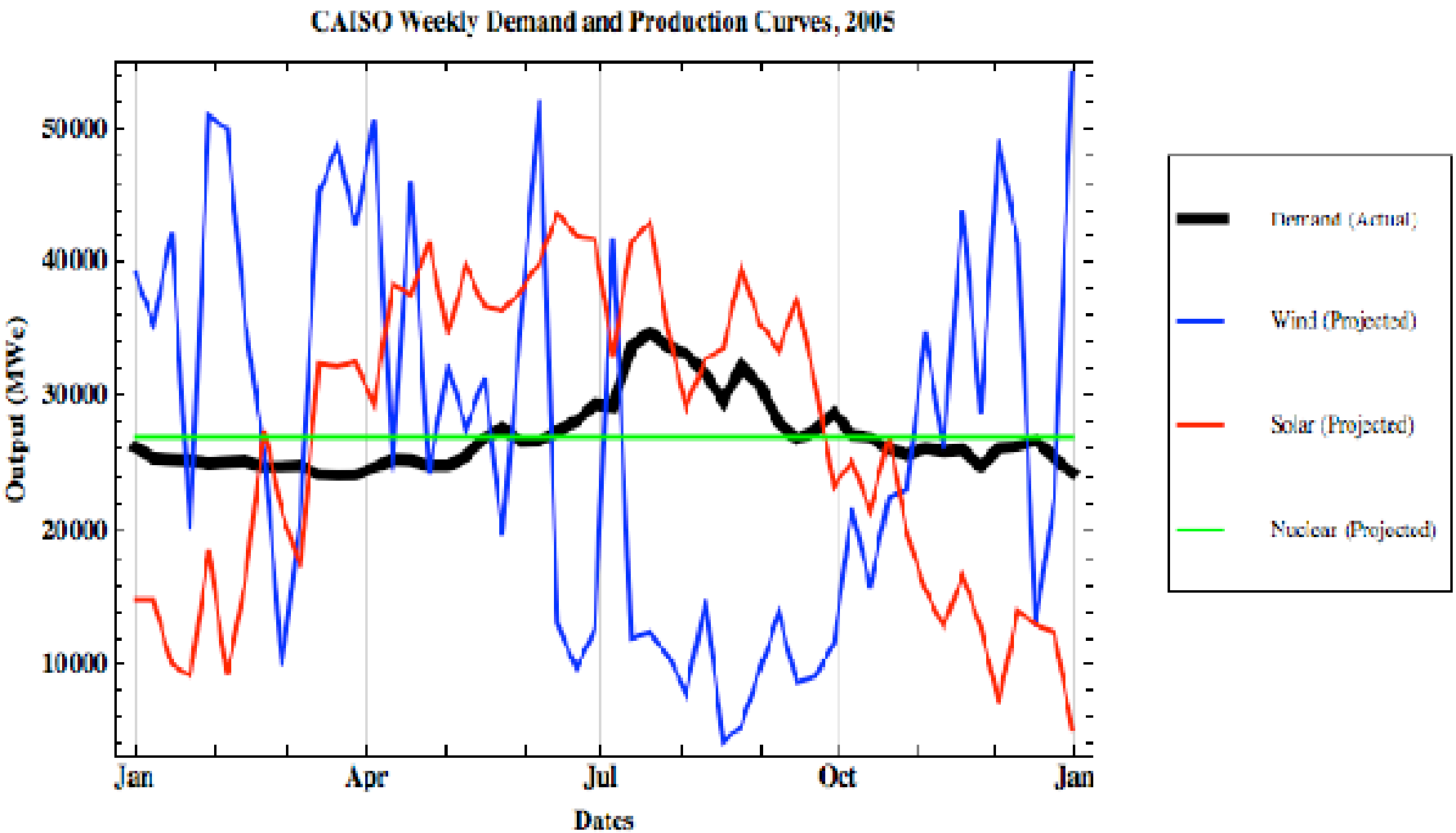


Figure 2. California Electricity Demand and Production (MWe) with All Nuclear, All Wind, or All Solar Power Generation vs. Time of Year[7]

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

Table 1. Electricity Storage Requirements as Fraction Total Electricity Produced[5, 6]

	Hourly	Daily	Weekly
Nuclear	0.07	0.04	0.04
Wind	0.45	0.36	0.25
Solar	0.50	0.21	0.17

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

Sintesi del Rapporto MIT-NES-TR015 (3/5)

Per **far fronte ai precedenti diagrammi di carico elettrico**, occorrerebbe **una fonte programmabile** in grado di arrivare a **coprire anche i picchi massimi** (in caso di assenza completa di sole e vento!): questa non può che essere **la nucleare** (avendo escluso le fonti fossili).

Ma quando il carico richiesto non è al massimo, e/o vi è produzione eolica o solare, la **sovraproduzione degli impianti nucleari** (che conviene operino sempre **“a tavoletta”**) deve essere utilizzata **in altro modo**, sia in forma **elettrica** che **termica**.

Sintesi del Rapporto MIT-NES-TR015 (4/5)

La **sovraproduzione degli impianti nucleari** può allora essere utilmente utilizzata **in forma elettrica** (circa 1/3 della potenza primaria):

- per **ricaricare impianti idroelettrici ad accumulo**;
- per produrre **idrogeno per via elettrolitica** (anche **elettrolisi ad alta temperatura**).

L'**idrogeno** può poi essere utilizzato come tale, o nella **sintesi di carburanti da biomasse**, o **aggiunto nei gasdotti** del gas naturale.

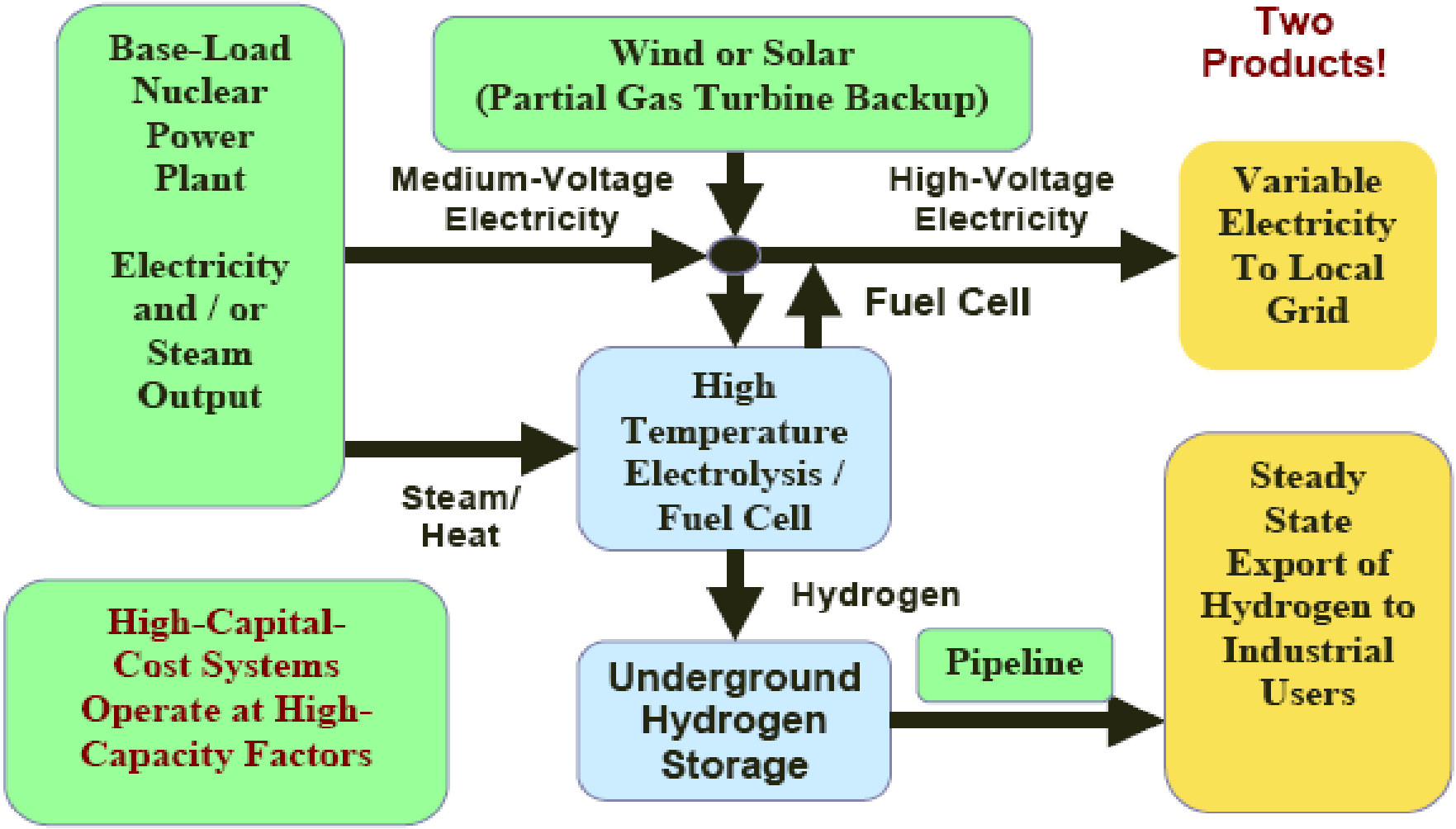


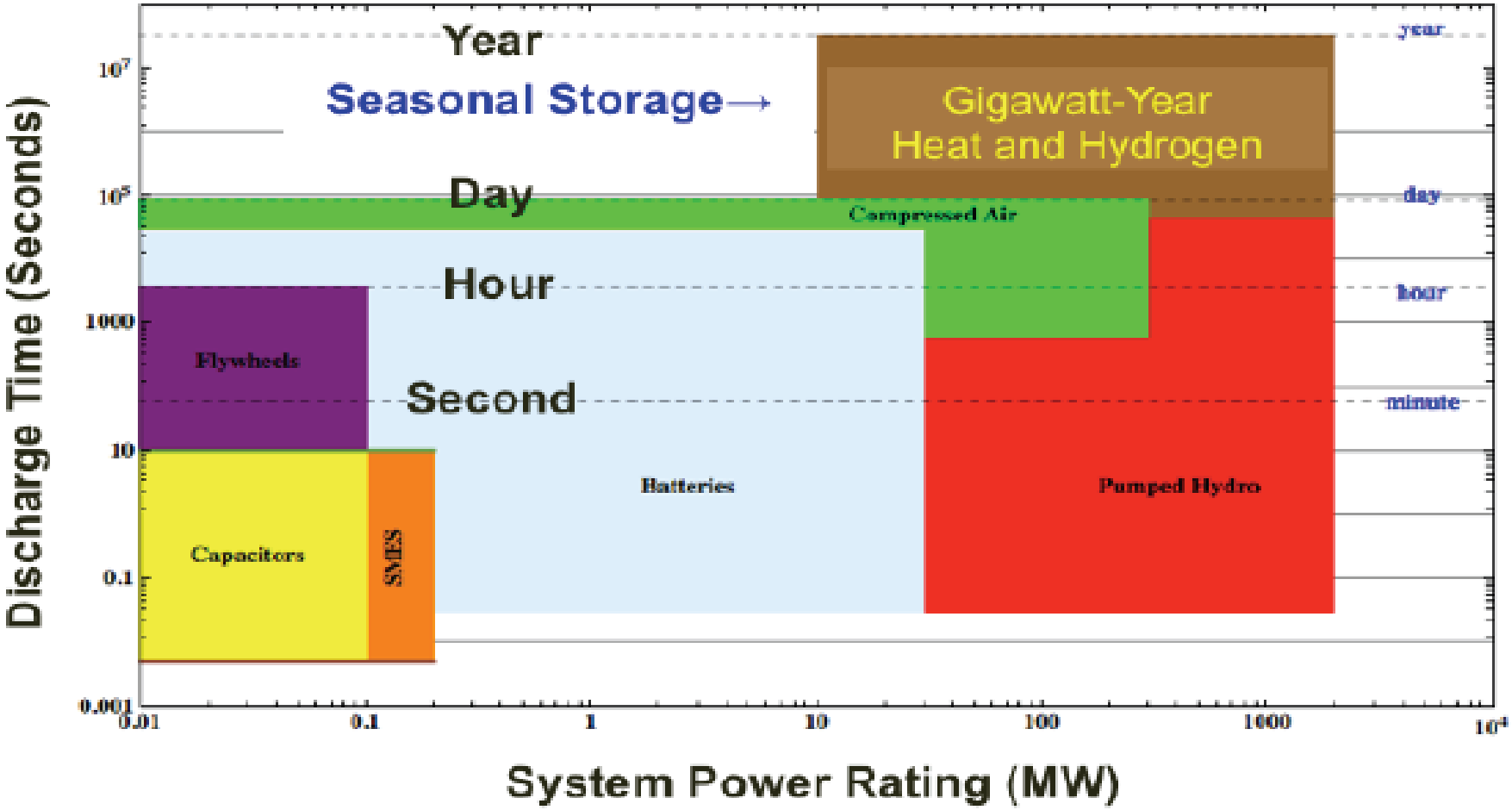
Figure 6. Electricity-Hydrogen System Design

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

Sintesi del Rapporto MIT-NES-TR015 (5/5)

La **sovraproduzione degli impianti nucleari** può anche essere utilmente utilizzata **in forma termica** (da circa 2/3 fino all'intera potenza primaria):

- per sfruttare i grandi giacimenti di **idrocarburi non convenzionali** (in sabbie, scisti) **evitando emissioni di carbonio**;
- per produrre **combustibili e carburanti da biomasse**, **evitando la loro combustione** per il calore di processo;
- per **riscaldare grandi volumi di sottosuolo**, da utilizzare come **fonte di energia geotermica** in tempi successivi.



SMES: **S**uperconducting **M**agnetic **E**nergy **S**torage systems.

Figure 3. Electricity Storage Technologies[8]

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

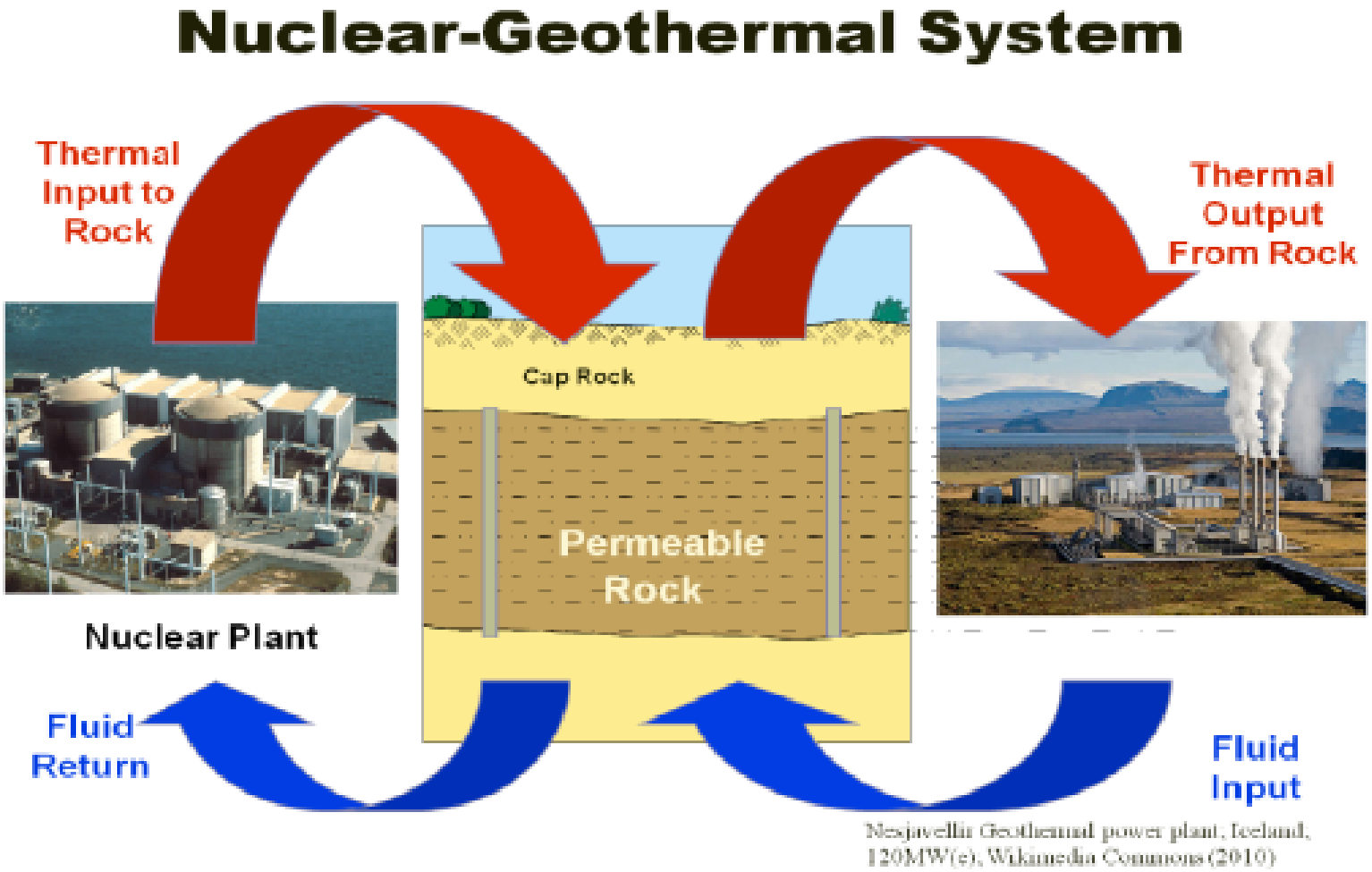


Figure 4. Conceptual Diagram of Nuclear-Geothermal Energy Storage System

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

Figure 9. Production of Liquid Fuels

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

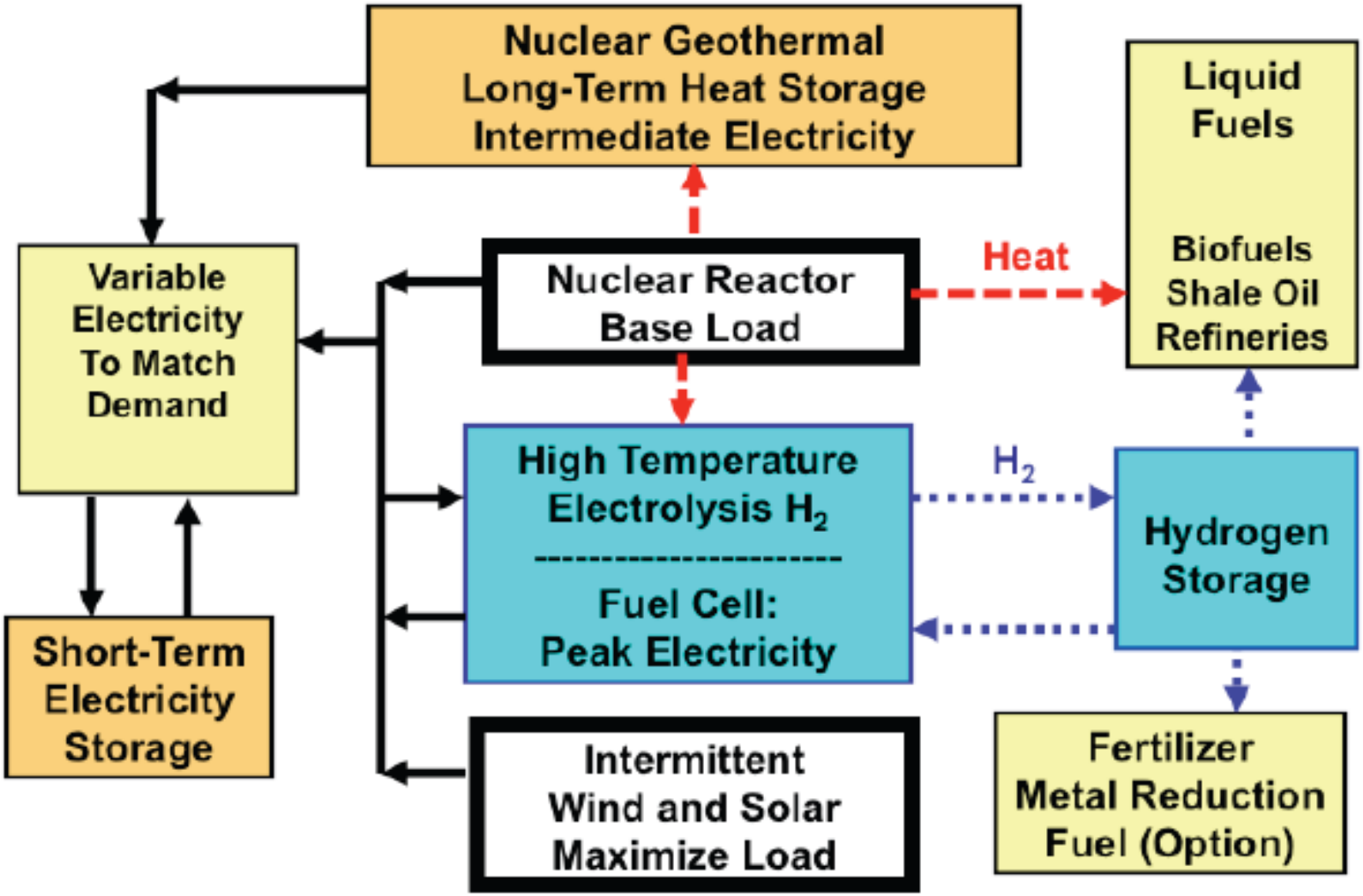


Fig. 17. A Low-carbon Nuclear Renewable System Architecture.

Da: Charles W. Forsberg - MIT-NES-TR-015 - September 2011.

Conclusioni

In ogni caso, **per molti anni le concentrazioni di gas-serra in atmosfera continueranno a crescere**, ed allora sarà indispensabile ed urgente **migliorare sistematicamente le nostre conoscenze sulla dinamica del clima**, e cominciare a prendere in seria considerazione l'opportunità di procedere **allo studio ed alla sperimentazione di tutti i mezzi in grado di contrastare direttamente gli effetti dell'Uomo su quella dinamica.**