

Analisi tecnica della conversione testate nucleari in combustibile per impianti elettronucleari

Massimo SEPIELLI (in collaborazione con Flavio Parozzi e Franco Polidoro)

Sommario

Viene svolta l'analisi generale dei requisiti per l'implementazione della riconversione delle testate nucleari nell'intero hot spot coreano ed in quella della sola nazione nord-coreana, insieme con la stima quantitativa del combustibile ricavabile per centrali elettronucleari.

Si considerano nell'analisi sia impianti con materiale fissile weapon-grade, sia reattori per uso energetico, ovunque dislocati: quelli della penisola, ma anche quelli all'esterno che risulterà possibile inserire nel programma energetico. Entrambi, nuovi o già esistenti, per i quali non sono richiesti adeguamenti strutturali. Per gli impianti già esistenti non sarebbe necessario aumento di potenza, aggiornamento tecnologico, ma solo una nuova pianificazione del Management del combustibile nell'impianto interessato dal Programma.

La dislocazione riguarda penisola coreana, Russia, Cina, Giappone e il programma potrebbe essere del tipo aperto e articolato in fasi, con un numero crescente di paesi/impianti coinvolti. Impianti sud-coreani in primis, almeno uno dei 20 impianti ad acqua leggera e, se richiesti, altri che potrebbero fornire energia. Il nuovo combustibile verrebbe dalla Corea del Nord e auspicabilmente a seguire da paesi nucleari presenti e limitrofi all'Area Coreana.

L'attività prevede sul materiale fissile "weapon grade" esistente nella penisola coreana la diluizione a "reactor grade", lo smaltimento, il reprocessing, e intervento sugli impianti nucleari esistenti in Corea del Nord. L'espatrio per la trasformazione in combustibile MOx e il futuro smaltimento del plutonio weapon-grade e diluizione fino al massimo arricchimento 4-5% dell'uranio weapon-grade (HEU) esistente in Corea del Nord; lo smantellamento dei relativi impianti di arricchimento (Yongbyon e Taechon) e dei reattori a grafite già previsti dal programma KEDO, con la sostituzione dei reattori a grafite con 2 altri ad acqua leggera, non idonei alla proliferazione.

Il calcolo dell'energia elettrica ottenibile dalla conversione innanzitutto dell'uranio weapon-grade sarebbe direttamente proporzionale al fissile nelle testate in disarmo e quindi al loro numero complessivo. L'elettricità dipenderà dal combustibile che si utilizza. Gli impianti elettronucleari che si prevede di poter utilizzare, sono in grado di smaltire fino a 100 testate nucleari per ciclo. Comunque il combustibile che proviene da 1 testata nucleare produrrebbe elettricità del valore di circa 0.225 TWh, cioè 225.000.000 kWh che al prezzo di almeno 0,15 €/kWh da 33 milioni di euro per ogni testata convertita, a disposizione di tutta l'area interessata.

Il Programma consente di realizzare un bilancio economico positivo dello specifico programma energetico poiché il Programma energetico nel suo complesso comprende l'analisi dei costi della conversione che riguardano: lo smantellamento degli impianti militari nucleari della Corea del Nord, la diluizione (costi molto ridotti) dell'uranio weapon-grade HEU fino al valore massimo del 5% di arricchimento, e l'espatrio del Plutonio weapon-grade per la conversione in combustibile MOx, management (molto ridotto) del nuovo combustibile nelle centrali esistenti impegnate nel Programma a cominciare dalla Corea del Sud.

I ricavi certi consisterebbero in:

- disponibilità di nuovo combustibile nucleare a costi solo politici, tenendo conto che nel Piano Usa-Russia "Megatons to Megawatts" è stato già inizialmente riconosciuto un valore di circa 1 milione di USD per testata convertita;
- conseguente produzione elettronucleare di 0,225 TWh, con prezzo di vendita che verrà fissato per i destinatari, ma che indicativamente (0.15€/kWh) porta a circa 33 milioni di euro per testata convertita in elettricità.

Premettendo che il costo del combustibile in una centrale nucleare è circa il 35% del costo totale di gestione dell'impianto, tenendo presente che il costo per la creazione di una impresa agricola autosostenentesi (dove lavorano almeno 10 capifamiglia) con fonti energetiche rinnovabili può costare fino a 100.000 €/cad: si ottiene che dal

beneficio economico di circa 33 milioni di euro/testata-convertita si possono realizzare fino a oltre 100 imprese agricola per ogni testata nucleare convertita.

Qualora invece le testate da convertire risultino, a seguito degli accordi che potranno essere raggiunti dalle Potenze impegnate nell'Area, in numero ben superiore ad 1 unità, si otterrebbero benefici molto più ampi da giustificare ampiamente la realizzazione della dorsale energetica del Piano e che attraversi tutta la Penisola, a partire dal Giappone e finire in Cina e Russia. Infatti nel Piano di Pace l'investimento indicativo di circa 50 mld di USD, sarebbe ampiamente ricoperto dai ricavi della conversione di 4000 testate per circa 130mld di USD.

Il programma nel suo complesso avrebbe una durata meno di 20 anni, estensibile. I Paesi da coinvolgere per una partecipazione diretta (le due Coree, USA, Cina, UE, Russia, Giappone,...) anche sotto il profilo economico/industriale. Anche altri Paesi, come l'Italia e della UE, che pur in un secondo tempo volessero associarsi.

Elementi mutuabili da programmi analoghi (" Megatons to Megawatts", KEDO, IRAN). Dal Piano Usa-Russia di conversione di 20.000 testate nucleari concluso nel 2013 Megatons to Megawatts si ha il processo strategico-industriale della effettiva trasformazione dell'esplosivo in combustibile nucleare. Dal Piano KEDO si può riprendere almeno la formula di sostituzione di impianti nucleari militari in impianti civili. Dal Piano d'accordo con IRAN si può prendere almeno la modalità di fornitura sotto egida IAEA del combustibile per le centrali nucleari civili, senza il bisogno del processo di arricchimento.

I costi generali (sin dove ora quantificabili): comprendono le spese di messa in sicurezza / trasformazione degli impianti esistenti, conversione in fuel del materiale weapon-grade, trasposto e stoccaggio del materiale fissile non immediatamente convertibile in fuel, costruzione di nuovi impianti e infrastrutture di rete, circa 50 mld di USD

Ricavi generali (considerando la sola vendita di energia elettrica ottenuta dalla conversione):

- | | |
|-------------------------------|-------------------|
| • conversione di 1 testata | 33 milioni di USD |
| • conversione di N. Testate | Nx 33 mln di USD |
| • conversione di 4000 testate | 132 MLD di USD |

Una prima stima dell'energia ricavabile dal recupero dell'uranio altamente arricchito da un dato numero di testate nucleari in disarmo è basato sui seguenti dati e stime preliminari:

Testate in Disarmo: 4000, Valore medio di Heu/testata 20 kg, equivalente di nuclear fuel (max al 4%)/kg di HEU (al 93%) 30 kg, quantitativo totale di nuclear fuel da disarmo: 3000 ton, ricarica intera del "core" di impianti da 1000 MWe con Nuclear Fuel 100 ton (96 ton di UO₂ nel caso dell'AP1000, secondo dati Westinghouse), numero di "core" alimentabili con Nuclear Fuel da Disarmo: 30, durata media di bruciamento della ricarica intera del "core": 4-4.5 anni, numero di anni-impianto da 1000 MWe richiesti per il disarmo: 120-135 anni-impianto, numero di reattori presenti e disponibili al disarmo da definire.

L'energia elettrica prodotta da 1 impianto da 1.000 MWe: 7.500 GWh/anno (con capacity factor del 86%; l'energia elettrica complessiva producibile dal disarmo: 900.000 GWh.

I calcoli qui presentati sono intesi a verificare tre possibili diluizioni dell'HEU con uranio a bassa concentrazione di isotopo 235: con uranio naturale (0.72% di U235), con uranio residuo degli impianti di arricchimento (0.2% di U235), con uranio recuperato dal ritrattamento del combustibile irraggiato (1.2% di U235).

Sono inoltre considerate due incertezze per ciò che riguarda sia il quantitativo di HEU per ogni testata, dai 20 ai 25 kg [2], sia la percentuale di isotopo 235, ragionevolmente compresa tra il 90% e il 93%.

Questo implica due valori possibili del materiale di partenza:

- ✓ un lower bound di 80 ton di HEU al 90% (72 ton di U235 + 8 ton di U238)
- ✓ un upper bound di 100 ton di HEU al 93% (93 ton di U235 + 7 ton di U238).

Con questo range di incertezza, si ottiene una stima dei quantitativi di nuclear fuel ricavabili da 4000 testate atomiche, in termini di tonnellate di UO₂ con differenti tassi di arricchimento. Come si può constatare, l'obiettivo delle 3000 tonnellate di combustibile con arricchimento del 4% appare raggiungibile ricorrendo alla diluizione con uranio naturale e, a maggior ragione, mediante diluizione con uranio proveniente da impianti di ritrattamento.

Nel caso di diluizione con uranio naturale, l'energia elettrica producibile con impianti LWR di attuale generazione (arricchimento medio 4.0% in U235), coerentemente con le incertezze riportate nella tabella, è calcolata in 553 – 708 TWh (539 – 696 TWh).

Sono stati poi calcolati i medesimi risultati per il caso di miscelazione con uranio proveniente dal ritrattamento (1.2% in U235).

- a) In conclusione, ipotizzando un combustibile UO₂ arricchito al 4%, il miscelamento del fissile da disarmo con l'uranio naturale può :
- b) produrre circa 3000 ton di combustibile nucleare da impiegare nei reattori commerciali LWR;
- c) generare energia elettrica per circa 700 TWh (se il miscelamento avviene con U²³⁵ al 1.2% si possono raggiungere gli 800 TWh, in ogni caso meno dei 900 TWh indicati).

I risultati ottenuti sono condizionati dall'aver assunto come tasso di bruciamento un valore medio di circa 27 GWd/t (per fuel al 4%), quando con i nuovi reattori (es. AP1000), ottimizzando le caratteristiche del combustibile (impiego di veleni bruciabili, logica di refuelling, improvement nei materiali) si possono raggiungere tassi medi di bruciamento, allo scarico, più elevati e superiori ai 30 GWd/t. Con questa osservazione, i 900 TWh di energia elettrica, indicati nei dati di progetto, possono ritenersi un target raggiungibile.

Applicando l'analisi al Hot Spot Coreano, valevole per la conversione di 4000 testate stimate nell'intero hot spot, alle stime derivanti dagli studi degli esperti militari di Civiltà dell'Amore relative alla sola PRNK e quindi di conversione di 40 testate ad Uranio arricchito e 10 a Plutonio, ed ipotizzando un arricchimento medio al 4% del combustibile per reattore civile in U²³⁵, si arriva a calcolare 30 - 40 tonnellate di combustibile, con le quali è possibile alimentare una centrale elettronucleare di generazione attuale da 1000 MWe per una produzione di energia complessiva pari a 7000 - 9000 GWh.

Considerando quindi il costo di conversione, cioè riprocessamento del materiale nucleare (K\$ / ton U 93%) più il costo di fabbricazione del nuovo combustibile fresco di tipo UO₂ o MOX (K\$ / ton U 4%), i costi di adattamento o di costruzione o riadattamento di impianti di riprocessamento, fabbricazione e di almeno una nuova e moderna centrale elettro-nucleare da 1000 MWe, che sia idonea a bruciare combustibile di tipo MOX, ed il costo dell'infrastruttura dorsale elettrica minima per la trasmissione di potenza alto voltaggio, si arriva alla stima totale intorno a 1, max 2 bilioni di dollari, che si sposa con quella preventivata di 130 bilioni di dollari per la conversione di 4000 testate ed il funzionamento di circa 30 noccioli di reattore.

Dall'altra parte, si considerano i ricavi economici derivanti dalla sola operazione di conversione, comprendenti il costo evitato del combustibile, la generazione di energia elettrica estesa al periodo di bruciamento, l'occupazione e l'indotto, si ha una stima dei ricavi di almeno 1 bilione di dollari, compensativa delle spese, con bilancio economico in parità, ma con un bilancio sociale straordinariamente positivo per i rischi incalcolabili evitati.

La conversione è pertanto tecnicamente perseguibile. Occorre predisporre impianti di riconversione e di utilizzo dell'energia prodotta in sito. L'operazione va condotta sotto l'egida IAEA e alla presenza di osservatori internazionali per evitare deviazioni dal programma. Il bilancio economico è in pari, quello sociale è altamente positivo.

Numerose sono le imprese del sistema nazionale, Enti e Istituti Italiani, che potrebbero essere potenzialmente coinvolti, quali ENEA, MISE, RSE, Ansaldo, Sogin, ENEL, TERNA, ENI, SNAM, SAIPEM, Mangiarotti.

Technical analysis of warheads conversion into fuel for civil nuclear power stations

Massimo SEPIELLI (in collaboration with Flavio Parozzi e Franco Polidoro)

Summary

A deep analysis is performed on requirements for implementing the conversion of nuclear warheads over the entire north-korean hot spot and more specifically over the north-korean homeland, along with a quantitative estimation of fuel amount for civil nuclear power stations.

Weapon grade fissile material is considered, both for fuel treatment and power production purpose plants, wherever located: within the Korean peninsula but also outside, to be as well included in the energy conversion programme: new facilities and existing facilities for which are not planned structural fitting. For existing plants, a power increase or technological revamping should not be needed, but only a new fuel management planning to comply the conversion programme.

The deployment covers the Korean peninsula, Russia, China, Japan and the programme should be open-type and scheduled by phases, with an increasing number of Countries involved. South-Korean plants first, at least one of 20 Light Water Nuclear reactors and, if required, some more ones asked to provide power. New fuel could come from North Korea and presumably from other Countries bordering the Korean area.

The program activity is based on dilution of "weapon grade" fissile material currently present in North Korea to "reactor grade" (reprocessing, disposal) and on nuclear facilities in PRNK. Next, the exportation and conversion of HEU and plutonium stored in North Korea into MOx fuel, by a dilution process up to an highest 4-5% enrichment; the decommissioning and dismantling of enrichment facilities (Yongbyon and Taechon) and the graphite moderated reactors already included in the KEDO programme, by replacing them with two more non-proliferating LWRs.

Exploitable electric power obtained by the conversion process of weapon grade uranium is directly proportional to the fissile material contained inside the weapon grade uranium and hence the material and the number of warheads to disarm. Further, the electricity amount will depend on the fuel to be used. Nuclear power plants intended to apply are able to burn up to 100 warheads per cycle. Anyway the fuel derived by 1 nuclear warhead is able to produce an electricity quantity equal to about 0.225 TWh, that is 225.000.000 kWh, equivalent to 33 Million Euros for each warhead, at the price of 0,15 €/kWh, available for the whole concerned area.

The Programme is capable to ensure a positive economic balance since the energy programme overall encompasses the all inherent conversion costs, from PRNK military nuclear facilities dismantling, to the dilution costs (quite low) up to 4-5%, the Pu exportation for MOx fabrication, and use of the new fuel in the NPP involved in the programme, in particular the South Korean ones.

The expected income would be: availability of new nuclear fuel at pure political costs, taking into account that for the USA-Russia Plan "Megatons to Megawatts" has been recognized a value equal to 1 million USD for each converted warhead; consequent power production of 0,225 TWh, with sale price settled by the users, but presumably around (0.15€/kWh), that is 33 million€ for each converted warhead into electricity.

Fixed the fuel cost to be 35% of the total management cost of a NPP, and taking into account the cost of a farm enterprise with ten working families, self-producing energy by renewable sources, could be up to 100.000 €/cad, you get an equivalent economic benefit of about 33 million Euro /warhead, and hence it's possible to supply more than 100 farm enterprises.

Whether the converted warheads were more than a single unit, due to agreements among the Countries running in the area, benefits should be much more and such to justify the construction of a power grid running through the Korean peninsula, from Japan to China and Russia. In fact, the Peace Plan implies an expected investment of around 50 billion USD, which should be totally covered by the incomes coming from conversion of 4000 warheads for a total of 130 billion USD.

The overall programme should last a 20 years, extendible. It directly involves Countries such as No'orth and South Korea, USA, China, Russia, Japan), and, under the industrial and economic profile, many other Countries such as Italy and UE, and more to associate even later.

Both "Megatons to Megawatts", or other programs such as KEDO, IRAN, are to be strongly considered as past experience to apply in this program. From past Usa-Russia plan on 20.000 warheads conversion ended in 2013, Megatons to Megawatts, you can extract the strategic-industrial process of the actual transformation from weapon to nuclear civil fuel. From KEDO, you can take the formula of replacement of nuclear military facilities into civil ones. Finally, from IRAN plan, you can take the provision, under IAEA supervision, of nuclear fuel for civil plants without need of any enrichment.

Concerning general costs, as far as estimable, they include the safety, the transformation of existing plants, the fuel conversion, the transportation and storage of fissile material, the construction of new facilities and grid infrastructures, overall 50 billion \$.

General incomes, which consider the sale of electric power from conversion, are:

conversion di 1 warhead	33 millions USD
conversion ofi N. warheads	Nx 33 mln USD
conversion di 4000 warheads	132 billion USD

A first estimation of the energy amount retrievable from HEU recovery from a stated number of disarmed warheads is based on the following data:

Desarmed warheads: 4000, Average amount of HEU/warhead: 20 kg, equivalent nuclear fuel (max 4%)/kg HEU (93%): 30 kg, total nuclear fuel from disarmament: 3000 ton, total refuelling of 1000 MWe NPP "core" with Nuclear Fuel: 100 ton (96 ton UO₂ for AP1000, by Westinghouse), number of "core" fed by Nuclear Fuel from disarmament: 30, average burning time of total refuelling of whole "core": 4-4.5 years, number of years-reactor numero for a 1000 MWe plant required for disarmament: 120-135 years-reactor, number of reactors available for disarmament: tbd. Power from a single 1.000 Mwe station: 7.500 GWh/year (86%capacity factor; total energy from disarmament: 900.000 GWh.

Computation has intended to verify three potential dilutions of HEU with low U235 concentration: natural U (0.72% U235), depleted U as exhaust stream of enrichment process, (0.2% U235), U recovered from spent fuel reprocessing (1.2% U235).

Two more uncertainties are concerned with the amount of HEU for each warhead, ranging from 20 to 25 kg, and the percentage of 235, reasonably spanning from 90% to 93%.

This causes two possible values for nuclear material at the initial stage:

lower bound of 80 ton HEU 90% (72 ton U235 + 8 ton U238)

upper bound 100 ton HEU 93% (93 ton U235 + 7 ton U238).

Considering this uncertainty range, a spread of estimations is obtained for nuclear fuel acquired from 4000 warheads, in terms of tons of UO₂ with different rates of enrichment. As you can see, the result of 3000 fuel tons 4% is obtained by diluting with natural uranium and, even more so, with dilution in fuel from reprocessing plants.

In the case of dilution with natural uranium, electric power with current generation LWR (4.0% in U235), with uncertainties, results as 553 – 708 TWh (539 – 696 TWh).

Same results in the case of U coming from reprocessing plants (1.2% in U235).

In conclusion, with UO₂ fuel 4%, the mixing of fissile from disarmament with natural U can:

give 3000 ton of nuclear fuel for commercial LWR reactors;

produce electric power for around 700 TWh (for U235 1.2% mixing you can reach 800 TWh, less than 900 TWh expected).

Results are affected by the assumption of burning rate average value equal to 27 GWd/t (fuel 4%), while new reactors (i.e. AP1000), by fuel performance optimisation with burnable poisons, refuelling strategy, material improvement), can reach average burn-up rates higher than 30 GWd/t. By this, 900 TWh electric power, as expected in the design goals, are achievable.

By applying the analysis made for 4000 warheads, valid for the entire hot spot, to the only North- Korean homeland, and based on the related Civiltà dell'Amore military expert estimation of number of PRNK warheads, the conversion of 40 HEU and 10 Pu warheads has been considered, together with a U235 4% average enrichment of civil reactor fuel, we come to calculate up to 30 - 40 tons of fuel, able to supply a 1000 MWe electro-nuclear power station suitable to produce a total 7000 – 9000 GWh.

Regarding costs, conversion – reprocessing of nuclear material (K\$ / ton U 93%), plus the fabrication cost of UO₂ / MOx fresh fuel (K\$ / ton U 4%), the reprocessing facilities revamping / construction costs, the construction of a new modern 1000 MWe NPP, able to burn MOx fuel, and finally the electric grid infrastructure to convey high voltage power, you can estimate a total of 1-2 billion dollars, matching exactly with the forecast of 130 billion dollars for the total conversion of 4000 warheads and the operation of 30 reactor cores.

From the other side, economic revenues must be accounted, limited to the only conversion, coming from the avoided fuel purchase cost, the sale of the electricity as extended to the entire time of operation (4-5 years), the spin-off to the other economic satellite activities, the new employment, you can calculate an income of some billion \$, compensating the expenses, to get a overall economic in parity, but an enormously positive balance in terms of social benefits and dramatic risks avoided.

Conversion is then technically pursuable. It's needed to set up on-site plants and facilities to convert and use energy on the homeland. The deployment must be supervised by international authorities such as IAEA inspectors and observers to avoid any programme deviation.

Italian enterprises/industries, organisations and institutions system could potentially be interested in the programme, with several actors such as ENEA, MiSE, RSE, Ansaldo, Sogin, ENEL, TERNA, ENI, SNAM, SAIPEM, Mangiarotti Nuclear.