



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Dipartimento Energia



IT9800177

SVILUPPI E PROSPETTIVE DEGLI SCAMBIATORI DI CALORE CERAMICI PER L'IMPIANTISTICA ENERGETICA AD ALTA TEMPERATURA

MARCELLO CAPRA

ENEA - Centro Ricerche Casaccia, Roma

RT/ERG/97/5

29 - 12



Testo pervenuto nel giugno 1997

**I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.**

ABSTRACT

The Development of Heat Exchangers with Advanced Thermomechanical Materials

Current metallurgical limitations necessarily impose a number of restrictions on the efficiency of power plant and combustion systems. These limitations include both temperature and corrosion resistance. If significant improvements can be made in these areas, then not only will it be possible to obtain higher system efficiencies, but it will also be possible to further exploit new technologies.

Consequently, there is appreciable interest in the development of ceramic tubes for heat exchangers. Such tubes would offer the potential of operation at much higher temperatures - with minimal creep - combined with a much improved resistance to chemical attack.

They are, however, unlikely to be suitable for high pressure operation, at least in the foreseeable future, and hence their use would be limited generally to gas to gas exchangers.

In spite of the limitations on details and specific technological solutions imposed by industrial property conditions, this report provides an overview on the development of these components, which is in charge of all the major international industrial companies of the field, in consideration of the relevant benefits coming from their large industrialization.

After an analysis of the industrial situation of the product, in terms both of possible applications and economical impacts on the market, an overview of major on-going R&D programmes is carried out. At present, these programmes are mostly within the general frame of the study of advanced thermomechanical components and the related manufacturing technologies development.

[HEAT EXCHANGE, CERAMIC MATERIALS, HEAT EXCHANGERS, HIGH TEMPERATURE TECHNOLOGY, POWER GENERATION, PROCESSING TECHNOLOGIES]

RIASSUNTO

Le attuali limitazioni a livello metallurgico impongono necessariamente una serie di restrizioni sulle prestazioni degli impianti di produzione dell'energia e dei sistemi di combustione. Tali limitazioni hanno un diretto impatto sulla resistenza sia alla temperatura che alla corrosione. Ne consegue che, se significativi miglioramenti possono essere conseguiti in questi settori, allora non solo sarà possibile ottenere sistemi più efficienti ma anche sfruttare ulteriormente le nuove tecnologie sviluppate.

Di conseguenza, sussiste a livello internazionale un significativo interesse nello sviluppo di scambiatori di calore dotati di tubi ceramici.

Tali tubi potrebbero garantire il potenziale di un esercizio a temperature molto più alte (con creep minimo) unitamente ad una maggiore resistenza all'attacco chimico. L'evoluzione delle ricerche attualmente in corso fa prevedere che in un prossimo futuro siano disponibili prototipi industriali per lo scambio termico gas/gas, mentre sviluppi per impieghi ad alta pressione sono al momento meno probabili almeno in tempi brevi.

Senza entrare in dettagli di carattere tecnologico oggetto di proprietà industriale, il presente documento effettua una rassegna aggiornata sullo sviluppo di questi componenti che vede impegnati i maggiori gruppi industriali a livello internazionale, viste le rilevanti ricadute strategiche derivanti da una loro diffusa industrializzazione. Dopo un'analisi della situazione industriale del prodotto, in termini sia di possibili applicazioni sia di impatti economici sul mercato, viene effettuata una esposizione dei principali programmi di R&S in corso, che al momento in gran parte rientrano nell'ambito più generale dello studio dei componenti termomeccanici avanzati e dello sviluppo delle relative tecnologie di fabbricazione.

[SCAMBIO TERMICO, MATERIALI CERAMICI, MATERIALI TERMOMECCANICI, SCAMBIATORI DI CALORE, ALTA TEMPERATURA, GENERAZIONE DELL'ENERGIA, PROCESSI INDUSTRIALI]

1. INTRODUZIONE

Le attuali limitazioni di impiego ad alta temperatura ed in ambienti corrosivi dei materiali correntemente utilizzati nell'impiantistica energetica impongono necessariamente una serie di restrizioni sulle prestazioni degli impianti di produzione dell'energia e degli impianti di processo industriali. Pertanto la possibilità di conseguire significativi miglioramenti in questi settori può sicuramente favorire l'impiego di sistemi più efficienti e l'ulteriore sfruttamento delle nuove tecnologie sviluppate.

Vi sono diverse situazioni in cui la resistenza dei metalli all'attacco chimico rende l'impiego delle apparecchiature di scambio termico difficile se non addirittura impraticabile, come ad esempio negli impianti di incenerimento dei RSU dove, sebbene le temperature siano solo dell'ordine di 800°C, le sostanze contenute nei fumi di scarico sono fortemente corrosive.

Inoltre i problemi associati allo scorrimento viscoso (creep) ed all'attacco delle ceneri fuse limitano le temperature dei metalli negli impianti convenzionali a carbone a circa 600-650°C e, sebbene alcune leghe ad alta temperatura, del tipo rinforzato con dispersione di ossido, consentano un esercizio soddisfacente a temperature più alte (fino a 1100-1200°C), il conseguente incremento dei costi di fabbricazione della caldaia può risultare proibitivo rispetto ai vantaggi conseguiti.

Di conseguenza, sussiste a livello nazionale e soprattutto internazionale un significativo interesse nello sviluppo di scambiatori di calore dotati di tubi ceramici. Tali tubi potrebbero garantire un esercizio degli impianti a temperature molto più alte (con creep minimo) unitamente ad una maggiore resistenza all'attacco chimico. L'evoluzione delle ricerche attualmente in corso fa prevedere che in un prossimo futuro siano disponibili prototipi industriali per lo scambio termico gas/gas, mentre sviluppi per impieghi ad alta pressione sono al momento meno probabili almeno in tempi brevi.

Il presente documento si propone di aggiornare la situazione relativa allo sviluppo di questi componenti che vede impegnati i maggiori gruppi industriali a livello internazionale, viste le rilevanti ricadute strategiche derivanti da una loro diffusa industrializzazione. Dopo una dettagliata analisi sulla situazione industriale del prodotto, in termini sia di possibili applicazioni sia di impatti economici sul mercato, viene effettuata una rassegna dei principali programmi di R&S in corso a livello nazionale ed internazionale, che al momento in gran parte rientrano nell'ambito più generale dello studio dei componenti termomeccanici avanzati e dello sviluppo delle relative tecnologie di fabbricazione. Vista l'importanza strategica delle attività in corso, per motivi di riservatezza industriale non sempre è stato possibile fornire maggiori dettagli sullo svolgimento dei programmi e le informazioni contenute nel documento provengono in gran parte da pubblicazioni ufficiali e da esperienze dirette dello scrivente maturate nell'ambito di progetti di R&S avviati nel settore. L'ENEA è da tempo impegnato in alcune attività con strutture di competenza multidisciplinari ed in collaborazione con diverse organizzazioni nazionali e comunitarie.

Scopo di questo documento è pertanto quello di fornire un'analisi ed una descrizione dei programmi di sviluppo in corso su un argomento di notevole importanza strategica nel settore dell'impiantistica energetica.

2. LA SITUAZIONE INDUSTRIALE

Si registra in ambito internazionale ed in Italia un crescente interesse all'impiego di scambiatori di calore dotati di tubi ceramici in diversi settori industriali caratterizzati da processi in cui si verifichi la necessità di trasferire significative quantità di calore ad elevate

temperature in presenza di fluidi aventi caratteristiche chimico-fisiche particolarmente critiche.

L'analisi della situazione industriale è rivolta all'individuazione dei problemi attualmente esistenti nei processi in uso ed alle soluzioni che l'impiego degli scambiatori ceramici potrebbe offrire per superarli.

Essa è stata concentrata su alcuni settori in cui si presenta particolarmente indicato l'utilizzo di tubi ceramici, anche in relazione alle potenzialità ed ai margini di miglioramento attesi delle possibili applicazioni. Con riferimento prevalente alla situazione internazionale (che presenta aspetti di diversità con quella interna italiana), tali settori sono:

- la generazione dell'energia elettrica
- la cogenerazione ed il waste-to-energy
- l'industria di processo

Per ognuno di essi verrà effettuata un'analisi dei problemi e verranno illustrate in dettaglio le possibili applicazioni degli scambiatori prendendo a riferimento condizioni reali di esercizio industriale allo scopo di evidenziare anche gli aspetti ingegneristici delle varie applicazioni.

Le considerazioni indicative che seguono sono il risultato di valutazioni e di informazioni diverse di varia provenienza (AIE, DOE-USA, WORLD BANK, Industrie italiane ed estere, etc.). Lo scopo principale di esse è prevalentemente quello di illustrare al lettore i notevoli potenziali di sviluppo ed applicazione degli scambiatori ceramici piuttosto che quello di fissare elementi di sicuro riferimento quantitativo.

2.1. La generazione dell'energia elettrica

Le tendenze in atto a livello internazionale per i Paesi avanzati OCSE, in considerazione di un tasso di crescita della domanda relativamente contenuto, nel settore energetico registrano in particolare:

- un cambio di tecnologia dominante: le turbine a gas (ed i cicli combinati) stanno assumendo un ruolo predominante rispetto ai cicli a vapore, favorite anche dall'attuale prezzo contenuto del gas naturale e dai ridotti impatti ambientali che la sua combustione comporta;
- la tendenza ad una liberalizzazione del mercato della generazione dell'energia, che porterà rapidamente gli autoproduttori ad ordinare fino ad oltre il 50% dei nuovi impianti di potenza, con conseguenti: competitività misurata in termini di costo del kWh generato (anzichè del kW installato), riduzione della taglia media degli impianti ed interesse sempre maggiore nei confronti dei combustibili non convenzionali.

Si osservano invece per i mercati dei Paesi in via di sviluppo tassi di crescita della domanda molto sostenuti. Tali tendenze condizioneranno anche lo scenario del prossimo secolo e comporteranno innanzitutto un ampliamento della presenza di turbine a gas in impianti alimentati con combustibili diversi dal gas naturale, ed in particolare alimentati a carbone. Da quest'ultimo si ottiene attualmente il 35% dell'elettricità prodotta a livello mondiale e si prevede un suo impiego rilevante anche nel prossimo secolo: recenti stime dell'EPRI (USA, 1995) attestano una crescita del consumo del carbone nel 2020 del 31% rispetto al 1990.

L'affermarsi del carbone sul lungo termine dipenderà tuttavia dalla disponibilità di tecnologie efficienti (in grado di utilizzare configurazioni impiantistiche con turbine a gas) e pulite in termini di contenimento delle emissioni di NOx e SOx. Attualmente vi sono numerosi cicli avanzati per la produzione dell'energia in fase di sviluppo, ma per molti di essi in competizione vi è un comune denominatore tecnologico: la possibilità di utilizzare il carbone in cicli termici con turbina a gas. Tra questi in particolare l'IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), il PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustor) e l'EFCC (Externally Fired Combined Cycle).

La disponibilità delle tecnologie pulite del carbone non sarà tuttavia contemporanea per tutte le tecnologie: infatti il sistema EFCC, il cui sviluppo dipende completamente da quello degli scambiatori ceramici oggetto del presente rapporto, è tuttora in una fase di R&S a livello mondiale, mentre i cicli PFBC e IGCC sono in fase dimostrativa. Di conseguenza lo scenario di lungo periodo prevede che nel 2015 la tecnologia EFCC possa coprire circa il 12% dei nuovi ordini di impianti di generazione dell'energia elettrica a livello mondiale, pari a circa 15 GW/anno; nel periodo 2005-2015 il mercato complessivo è valutabile in 40-70 GW. Tale mercato può essere riportato a quello dei componenti ceramici che costituiscono in parte lo scambiatore di calore ad alta temperatura: assumendo pari al 15% il costo medio dello scambiatore rispetto al costo capitale totale dell'impianto (1600 \$/kW), e considerando che il 50% del valore del componente è riferibile ai componenti ceramici avanzati, si può valutare nel periodo 2005-2015 un mercato pari a 4800-8400 M\$.

Tale scenario è tuttavia condizionato dalla disponibilità della tecnologia EFCC nell'anno 2005. Nel seguito verranno analizzati i cicli IGCC e EFCC e le relative modalità di applicazione degli scambiatori ceramici.

2.1.1. Ciclo IGCC

Il ciclo IGCC è stato oggetto di molteplici interessi negli ultimi anni. Ciò è dovuto innanzitutto agli avanzamenti registrati nel settore della tecnologia della turbina a gas che hanno condotto alla realizzazione di macchine di grande taglia (fino a 200 MW) adatte per la generazione di energia. Inoltre i limitati rendimenti sono stati notevolmente migliorati a seguito degli sviluppi, soprattutto metallurgici, che hanno consentito di raggiungere temperature di ingresso alla turbina di circa 1260°C.

In secondo luogo, i sistemi IGCC, pur avendo costi di investimento maggiori di quelli dotati di caldaie a polverino di carbone, presentano livelli di emissione di NOx e SOx generalmente inferiori ed ampiamente in accordo con i limiti esistenti e previsti dalla normativa europea. Inoltre il maggiore rendimento si traduce in minore emissione di CO₂ (a parità di produzione) e questo risulta particolarmente positivo nell'ambito del dibattito in corso sul cambiamento climatico e nella prospettiva di una tassa europea sull'energia.

Uno schema tipico di IGCC è riportato in Fig. 1.

Attualmente vi sono diverse tipologie di gassificatori, alcuni già in fase commerciale, altre ancora in fase di sviluppo.

Essi possono essere suddivisi in tre categorie: a letto fisso, a letto fluido ed a flusso trascinato. Le caratteristiche principali dei sistemi sono illustrate in Fig. 2.

Nei gassificatori a letto fisso viene generalmente utilizzato carbone di pezzatura grossa, con un'alimentazione superiore per incrociare l'agente gassificante (vapore + ossigeno) ascendente; il carbone è inizialmente essiccato, successivamente pirolizzato ed infine gassificato, e la cenere viene rimossa in uno stato solido o fuso.

Nel processo a letto fluido viene utilizzato un carbone più fine e la temperatura di gassificazione è limitata per assicurare che la cenere non diventi molle.

Nel gassificatore a flusso trascinato le temperature sono molto più alte ed il prodotto finale consiste in un gas libero da catrame e petrolio composto soprattutto da CO e H₂. La rimozione della cenere avviene allo stato fuso e l'alimentazione del carbone può essere sia a secco che sotto forma di miscela con acqua.

La Tab. 1 sintetizza le condizioni di funzionamento dei vari gassificatori attualmente più conosciuti con alcune informazioni circa il loro stadio di sviluppo. Come si può rilevare il

sistema in più avanzata fase di dimostrazione commerciale è quello a flusso trascinato. Esso sembra dimostrare il maggiore potenziale ed ha l'ulteriore vantaggio che tutti i composti organici potenzialmente pericolosi vengono distrutti come conseguenza delle elevate temperature a cui avviene il processo di gassificazione.

Per quanto riguarda l'applicazione degli scambiatori a tubi ceramici nel ciclo IGCC, occorre tenere presente la loro prerogativa più importante che è quella di sopportare temperature molto più alte di quelli a tubi metallici. Essi non sono tuttavia in grado di garantire le stesse proprietà meccaniche e quindi non si prestano per impieghi con vapore o acqua ad elevate pressioni. Pertanto nel ciclo IGCC si possono considerare applicazioni come scambiatori gas/gas o gas/aria. Ne consegue perciò che il calore recuperato può essere più efficacemente utilizzato nel ciclo Brayton (turbogas) piuttosto che in quello Rankine (turbina a vapore).

La sezione di impianto che si presta meglio per un recupero di calore è all'uscita del gassificatore. Ad esempio, nel processo Shell utilizzato a Baggenum, il gas grezzo in uscita dal refrigeratore è ricircolato per operare un raffreddamento rapido del gas stesso da 1500°C a 900°C prima che esca dal gassificatore. In tal modo la cenere fusa si raffredda all'interno del gassificatore e precipita anziché essere trasportata nel refrigeratore del gas. Tale approccio è tuttavia inefficiente sia in termini di maggiore potenza di pompaggio che di sovradimensionamento del componente. L'estrazione di una parte (di tutto) questo calore mediante l'utilizzo di uno scambiatore a tubi ceramici consentirebbe una riduzione (un'eliminazione) del quantitativo di gas ricircolato. Inoltre, visto che tali tubi possono operare a temperature molto maggiori, ci sarebbe una minore tendenza delle ceneri fuse a raffreddarsi sulle pareti dei tubi e quindi sarebbe possibile sopportare temperature maggiori del gas.

L'utilizzo di aria come mezzo refrigerante ha una controindicazione, in particolare: in caso di rottura dei tubi sussiste il rischio di una miscela potenzialmente esplosiva. Per tale ragione, gas quali N₂, CO₂ (sistema chiuso) o il gas prodotto (sistema aperto) sono da preferirsi e, chiaramente, il sistema aperto costituirebbe l'opzione meno costosa.

In Fig. 3 è illustrato uno schema del sistema di gassificazione esistente a Buggenam ed in Fig. 4 è presentata la modifica proposta con l'inserimento di uno scambiatore a tubi ceramici. Essendo coinvolte elevate pressioni, è stata scelta una configurazione "shell & tube" con il gas prodotto sporco sul lato-mantello per minimizzare l'impatto dello sporco. Questa soluzione ha anche il vantaggio di assicurare che i tubi ceramici siano sotto compressione piuttosto che sotto tensione a causa degli sforzi generati dalla pressione.

Nella configurazione modificata il gas caldo lascia il gassificatore ed entra nello scambiatore a 1500°C dove è raffreddato fino a 900°C prima di passare nel refrigeratore del gas di sintesi. La necessità di ricircolare il gas è perciò eliminata, consentendo una significativa riduzione nelle dimensioni del refrigeratore e dei collegamenti associati. E' opportuno tuttavia rilevare che ciò può condurre a problemi di sporco.

Mentre si prevede che l'uso di scambiatori ceramici con maggiori temperature superficiali possa minimizzare il problema, in pratica può essere necessario intrappolare la maggior parte delle scorie con mezzi meccanici prima che possano entrare nello scambiatore.

2.1.2. Ciclo EFCC

Questo ciclo si presenta estremamente interessante in prospettiva sia nel settore della generazione dell'energia elettrica sia in quello della cogenerazione e del waste-to-energy. Lo schema di riferimento è illustrato nelle Fig. 5-6. Esso è un tipico ciclo combinato in cui un ciclo Brayton modificato (TC) è unito ad un ciclo Rankine tradizionale (BC) attraverso una caldaia di recupero di caratteristiche adeguate allo scopo.

Le principali caratteristiche del ciclo sono:

- un buon bilanciamento tra i due cicli integrati ;
- un ampio campo di regolazione per la turbina a gas ;
- una riserva addizionale di potenza garantita dalla presenza di un combustore ausiliario;
- diverse procedure di controllo per regolare la temperatura di ingresso del gas agli scambiatori ceramici.

Le condizioni di funzionamento per lo schema di riferimento sono riportate in Tab. 2.

Lo scambiatore di calore è il componente chiave del ciclo EFCC in quanto consente di separare il processo di combustione dalla turbina a gas.

In particolare ne risultano due significativi vantaggi:

- la possibilità di produrre energia elettrica (e/o calore) da una turbina a gas utilizzando combustibili non tradizionali, quali biomasse e carboni ad alto contenuto di ceneri e particolato;
- il flusso di aria pulita in turbina che comporta una crescita della durata e la riduzione dei tempi di fuoriservizio.

La competitività di questo sistema (v. Fig. 5-6), specialmente sulla media taglia, è fortemente connesso al comportamento dello scambiatore. Tale componente risulta essere molto sollecitato da un punto di vista termico e, purtroppo, comporta una riduzione di rendimento a causa di un salto di pressione aggiuntivo indotto dalla sua presenza.

Per superare questo limite, esso deve essere spinto a lavorare a più alte temperature alle quali solo i materiali ceramici possono resistere. Questa condizione al contorno comporta elevati volumi che debbono essere minimizzati per limitare costi e problemi di progettazione ed installazione.

La vita media dello scambiatore per questo tipo di applicazione può essere solo desunta da altre applicazioni; considerando i problemi aggiuntivi dovuti allo shock termico nella fase di avvio iniziale si può prevedere una durata attuale di circa 5 anni, mentre 10 anni si possono considerare come un possibile obiettivo di sviluppo futuro.

La sostituzione di eventuali tubi danneggiati può essere effettuata compatibilmente con i tempi di manutenzione previsti per l'intero impianto, che sono generalmente a cadenza annuale. Pertanto la disponibilità risulta essere di circa 83,3%; un valore superiore al 91% può essere raggiunto in future applicazioni.

In Fig. 7 è illustrata una possibile disposizione dello scambiatore ed i relativi parametri di dimensionamento.

E' opportuno rilevare come il ciclo EFCC mantenga un ottimo rendimento anche a taglie ridotte, che rappresenteranno una frazione significativa del mercato della domanda nei prossimi anni (35% del totale sotto i 100 MW).

A livello internazionale si registrano attualmente due importanti programmi dimostrativi promossi dal Department of Energy (DOE) USA per iniziativa dei centri di Pittsburgh (PETC) e Morgantown (METC):

- il programma HIPPS (High Performance Power Plants), nell'ambito del Progetto "Combustion 2000" si propone nei prossimi 54 mesi di identificare il processo migliore tra due configurazioni proposte da due consorzi guidati rispettivamente da United Technologies (comprendente ABB Combustion Engineering, Bechtel, Pratt & Whitney) e Foster Wheeler (comprendente Westinghouse, TRW, Bechtel). Al termine di questa fase, che prevede ingegneria e prove in appoggio per un valore complessivo di circa 70 M\$, è prevista la costruzione di un prototipo.

- Il programma di Hague International , che ha già condotto alla realizzazione della prima e fino ad ora unica realizzazione a livello mondiale di un impianto dimostrativo EFCC completo a Konnenbunk (Maine) presso la Hague Int. Portland. L'impianto, che ha una potenza di circa 7 MWe (turbogas GARRETT da 3 MWe), è entrato in funzione nel 1995 e dispone di uno scambiatore di calore a 3 stadi, di cui 2 metallici ed il terzo ceramico del tipo S&T alto circa 20 m. L'impianto ha già dimostrato le prestazioni di uno scambiatore di calore realizzato in materiali compositi a matrice ceramica (CMC) fino alla temperatura di 1100 °C per circa 500 ore e l'integrazione del ciclo, con relativa produzione di energia immessa in rete dalla turbina a gas. Al momento sono in corso di effettuazione prove prolungate a carbone.

Nell'ambito del programma DOE "Clean Coal V" è stato inoltre approvato un ulteriore progetto dimostrativo EFCC della Hague International da 146 M\$ per la realizzazione di un impianto da circa 60 MWe di tipo retrofit in consorzio con la Pennsylvania Electric Co. a Warren (Pennsylvania); prima di procedere nella realizzazione si attendono tuttavia i risultati delle prove in corso a Konnenbunk.

A livello europeo, Ansaldo ha creato un gruppo di interesse su EFCC formato da circa 40 partners, comprendente imprese e centri di ricerca impegnati nello sviluppo dei materiali, nell'ingegneria e nella fabbricazione del componente scambiatore e del sistema EFCC. Fino ad oggi sono stati avviati due progetti a livello comunitario per un valore complessivo superiore ai 9 miliardi di lire, di cui si dirà con maggiore dettaglio in seguito.

2.2 Cogenerazione e waste-to-energy

Il ciclo turbogas a combustione esterna si presenta molto promettente anche nelle applicazioni ad impianti cogenerativi alimentati da combustibili non convenzionali ed in applicazioni waste-to-energy. La taglia tipica degli impianti, che è fino a due ordini di grandezza inferiore a quella degli impianti di potenza, potrà favorire lo sviluppo a livello commerciale di tali applicazioni in tempi ridotti rispetto a quelli degli impianti di potenza. Questo in relazione ai seguenti principali motivi:

- i processi di fabbricazione dei materiali CMC non sono stati sviluppati nè per produzioni intensive, nè per produrre manufatti di dimensioni adeguate all'introduzione in scambiatori per impianti di potenza e richiederanno tempi ed investimenti considerevoli prima che tale obiettivo possa essere raggiunto;
- le tecnologie di integrazione dei materiali CMC con gli altri materiali di cui il componente è costituito sono in fase di sviluppo: le dimensioni ridotte dello scambiatore possono renderne possibile la fattibilità anche in assenza di disponibilità di una o più tecnologie di integrazione;
- il rendimento elettrico richiesto a tali impianti è dell'ordine della metà di quello presentato dagli impianti di potenza. Infatti attualmente i cicli competitori si attestano intorno al 15-22%, in relazione al processo ed al tipo di combustibile utilizzato; inoltre all'abbassarsi del valore del combustibile si riduce conseguentemente l'importanza del rendimento ed i fattori-guida diventano il costo d'impianto, l'affidabilità e disponibilità, l'impatto ambientale. Tale scenario impone dunque prestazioni meno spinte ai materiali di cui lo scambiatore è costituito;
- le parti non convenzionali del sistema si riducono ad una parte dello scambiatore (quella costituita dai materiali CMC) in quanto il ciclo si può accoppiare a tecnologie esistenti di combustione/pirolisi/gassificazione; nel caso dei grandi impianti per la produzione dell'energia, invece, restano da affrontare problematiche di sviluppo anche sulla parte preposta alla combustione (combustore slagging, o High Temperature Air Furnace).

A livello europeo, soprattutto nei Paesi del Nord, si registra una crescente attenzione verso impianti cogenerativi alimentati da combustibili di scarso valore; il COGEN Europe riporta che nella sola Svezia sono previsti entro il 1997 almeno 325 MW di potenza in impianti cogenerativi di media taglia (da 40 kW a 40 MW) alimentati a legno, scorie, liquami ed altro.

In definitiva si ritiene pertanto che, dati i notevoli avanzamenti tecnologici ed economici intercorsi negli ultimi anni, anche in queste applicazioni di piccola taglia (in passato di esclusivo appannaggio dei motori a combustione interna) le turbine a gas possano svolgere un ruolo predominante. In Fig. 8 è illustrato lo schema di un processo che realizza mediante uno scambiatore ad alta temperatura un disaccoppiamento tra la linea fumi e la linea aria, ovviando alla limitata compatibilità dei turbogas con combustibili di scarso pregio. Tipicamente, qualora rivolti alla cogenerazione diffusa (taglie di 3-5 MW o meno), tali sistemi dovrebbero essere basati su un ciclo semplice, mentre per taglie da 20-30 MW risulta generalmente preferibile adottare un HRSG a valle sulla linea fumi.

I vantaggi che tale tecnologia offrirebbe sarebbero pertanto numerosi:

- utilizzo di combustibili diversi, con sistemi di clean-up a monte dello scambiatore molto semplificati, e comunque dipendenti dal processo di gassificazione/combustione adottato;
- alti rendimenti anche per diversi rapporti di carico elettrico/carico termico (il sistema gode di un grado di libertà aggiuntivo rispetto ad una normale configurazione);
- sistema sviluppabile in forma package e modularizzabile;
- sistema a basso costo capitale, basso costo di esercizio, alta affidabilità e disponibilità;
- sistema ben accoppiabile a diverse tecnologie di gassificazione/combustione;
- sistema il cui impatto ambientale dipende fortemente dalla tecnologia adottata per la trasformazione del combustibile, senza che ulteriori vincoli di clean-up siano posti dalla compatibilità con materiali di componenti dell'impianto.

Negli impianti di incenerimento ad esempio l'attacco corrosivo (dovuto in particolare ai metalli alcalini, ai cloruri ed ai composti dello zolfo) è il principale fattore limitante per la vita degli scambiatori di calore metallici, anche se le temperature sono relativamente modeste (800-900°C). Per i futuri progetti, gli elevati costi di manutenzione (circa 3 miliardi di lire per impianto ogni 10 anni) e la modesta affidabilità derivante dall'attacco corrosivo, sono i maggiori ostacoli alla diffusione di questa tecnologia come sistema economico per il condizionamento dei rifiuti. Gli scambiatori ceramici offrono pertanto la possibilità di un significativo miglioramento nella resistenza alla corrosione.

2.3 L'industria di processo

Il 30-40% del consumo di energia primaria nel mondo avviene nei processi industriali, che sono spinti dalla crescente competizione e dalle sempre più stringenti normative ambientali verso una ottimizzazione che li renda più efficienti, compatti e puliti. La disponibilità di adeguate tecnologie che consentano il perseguimento di tali obiettivi è particolarmente critica per l'Unione Europea dove le perdite energetiche da fluidi corrosivi ed erosivi sono state valutate nella sola UE pari all'energia prodotta da 40-80 centrali elettriche da 320 Mwe. L'introduzione diffusa di scambiatori di calore ad alta temperatura consentirebbe il recupero di circa il 50% di tale energia. La curva di distribuzione dell'energia usata nei processi industriali in funzione della temperatura di impiego evidenzia due picchi: il primo tra 150 e 250 °C, il secondo intorno ai 1400 °C: quest'ultimo è in particolare causato dalle richieste dei settori siderurgici, petrolchimici e del vetro. Stime USA (Business Communication Co. Inc.) prevedono che il mercato per gli

scambiatori ceramici sia valutabile intorno a 320-350 MECU nell'anno 2000, escludendo le applicazioni nel settore energetico.

In particolare l'eccezionale combinazione di resistenza allo shock termico, tenacità, resistenza meccanica e capacità di operare ad elevata temperatura dei materiali ceramici e di quelli compositi a matrice ceramica (CMC) rende questo tipo di materiali particolarmente interessanti per applicazioni potenziali in industrie impegnate nella realizzazione di prodotti ad alta temperatura. I gas di scarico prodotti in queste industrie generalmente contengono composti aggressivi, quali: fluoruri e cloruri nella fusione e nella raffinazione secondaria dell'alluminio; ossidi nella fusione e raffinazione del rame; zolfo, sodio, boro e silice nelle fornaci per la produzione del vetro; zolfo, fluoruri, polveri e vapore d'acqua in forni per ceramici e refrattari.

2.3.1 L'industria chimica

L'industria chimica e petrolchimica presenta importanti problematiche di scambio termico ad alta temperatura, concentrate prevalentemente in tutti quei processi che prevedono una demolizione termica od una reazione di scissione della carica di partenza. La disponibilità di scambiatori di calore ad alta temperatura costituirebbe un notevole avanzamento tecnologico in grado risolvere le attuali problematiche, quali gli "hot spots", formazione di coke con conseguente diminuzione dello scambio termico e surriscaldamento dei tubi.

Un'applicazione di riferimento è ad esempio il processo di produzione dell'etilene, nel quale ENICHEM è leader europeo e sesto produttore mondiale; in particolare l'introduzione dello scambiatore ceramico ad alta temperatura può rendere più efficiente il craking termico assistito con vapore.

I vantaggi previsti riguardano in particolare:

- l'innalzamento della temperatura di processo, che migliora la selettività a etilene
- incremento dello scambio termico, che migliora l'efficienza del processo
- riduzione dei problemi derivanti dalla formazione di coke
- incremento dell'affidabilità e durata dei tubi

L'impiego dei materiali ceramici avverrebbe per sostituire gli attuali "coils" o "serpentine", attualmente realizzati con acciai Ni-Cr, con altri realizzati in materiali ceramici. La tendenza attuale è di avere coils più sottili dove l'alimentazione è suddivisa su più tubi in parallelo allo scopo di avere tempi di contatto sempre più brevi (dell'ordine dei millisecondi) ed indirizzare in tal modo le reazioni verso i prodotti utili. I tubi che costituiscono i coils hanno una lunghezza variabile tra i 4 e gli 8 metri e spessore di 4-8 mm. La carica, miscelata al vapore, viene alimentata internamente ai tubi ad una temperatura di 600 °C; esternamente ai tubi, in una camera radiante, viene bruciato metano od olio combustibile. Il calore necessario alle reazioni viene quindi fornito indirettamente attraverso le pareti del tubo per irraggiamento. La temperatura di processo in uscita dal reattore raggiunge gli 890 °C con temperatura di parete esterna pari a 1100 °C. Il tempo di contatto dei gas nel reattore è di 0,2-1 secondi.

2.3.2 L'industria siderurgica

La nuova concezione industriale nel settore siderurgico tende a superare l'impiego di grandi stabilimenti, rivelatisi molto rigidi e poco adatti a seguire le fluttuazioni del mercato, privilegiando nuove concezioni tecnologiche:

- semplificazione drastica dei cicli produttivi a livello ghisa, acciaieria e laminazione;
- sviluppo di nuovi prodotti e componenti orientati all'utente finale e delle relative tecnologie di fabbricazione.

Le conseguenze dirette di tale impostazione sono:

- minori costi di investimento e di esercizio
- risparmio energetico
- forte riduzione dell'impatto ambientale
- maggiore flessibilità produttiva
- diffusione dei "mini-mills" e loro localizzazione presso i più importanti utilizzatori
- verticalizzazione spinta del prodotto
- accentuata interazione tra produttore ed utilizzatore finale.

In tali prospettive va ad esempio inquadrato il processo di Smelting Reduction che consente la fabbricazione di ghisa utilizzando carbone e minerale fine, eliminando cokerie ed impianti di agglomerazione. In Italia il CSM sta sviluppando il più avanzato di tali processi, denominato CCF, che prevede un unico reattore e l'utilizzo di materiale fine più economico. Tale reattore scarica gas chimicamente aggressivo a circa 1600 °C: il successo economico di tale configurazione impiantistica dipende fortemente dalla possibilità di recupero dell'energia ed in tal senso la disponibilità di uno scambiatore ceramico rappresenterebbe la soluzione ideale dal punto di vista del massimo sfruttamento energetico del gas.

Un processo CCF rende disponibili 4000 MJ/t di ghisa prodotta, a cui si aggiungono 3400 MJ/t di calore latente; tale gas esce a 1600 °C e può essere inviato ad uno scambiatore ceramico.

L'energia può essere quindi recuperata in due stadi successivi:

- inizialmente utilizzando l'entalpia dei gas nello scambiatore fino ad abbassare la temperatura a valori convenienti per la combustione;
- successivamente bruciando i gas, che presentano un potere calorifico di circa 1300 kcal/Nm³, e nuovamente recuperando l'energia prodotta dalla combustione dei gas del CCF.

Entrambi i contributi possono essere utilizzati nell'ambito di un ciclo a combustione esterna, con la possibilità di evitare il ricorso ai compressori dei gas di stabilimento, i quali comportano una penalità sul rendimento del ciclo di circa 8-10 punti percentuali.

3. IL RUOLO DEI MATERIALI

3.1. I materiali termomeccanici

L'impiego dei materiali ceramici per scambiatori ceramici di calore rientra nell'ambito più generale dei materiali innovativi per impieghi termomeccanici, che è attualmente oggetto di investimenti crescenti in tutti i Paesi industrializzati.

I materiali attualmente utilizzati nell'industria termomeccanica sono costituiti essenzialmente da leghe metalliche. Il loro impiego è limitato a determinate funzioni a causa del decadimento delle caratteristiche meccaniche e della scarsa resistenza all'ossidazione alle alte temperature. Il loro punto di forza è invece costituito dalla elevata tenacità. D'altra parte i materiali ceramici tradizionali, che sarebbero vantaggiosi sostituiti per quanto riguarda caratteristiche meccaniche e stabilità ad alta temperatura, non possono essere utilizzati a causa della elevata fragilità.

Lo sforzo di ricerca in atto ha come obiettivo quello di superare i limiti di impiego dei materiali tradizionali intervenendo sia a livello strutturale (eliminazione della fase vetrosa, controllo della dimensione dei grani e dei difetti nei materiali ceramici) sia a livello di composizione (leghe speciali e composti intermetallici), sia combinando le proprietà tipiche di materiali diversi. Quest'ultimo risultato può essere conseguito realizzando materiali compositi ottenuti disperdendo in una matrice metallica o ceramica particelle, whiskers o fibre continue di

materiale generalmente ceramico, oppure applicando sui materiali metallici rivestimenti protettivi (leghe speciali, composti intermetallici o ceramici).

I settori in cui si articola l'area dei materiali innovativi per applicazioni termomeccaniche risultano quindi essere:

1. materiali ceramici (monolitici e compositi)
2. materiali compositi a matrice metallica
3. leghe metalliche speciali e composti intermetallici
4. rivestimenti, riporti, barriere termiche

L'utilizzo dei materiali innovativi ha, come obiettivo finale, quello di ottenere componenti caratterizzati da una o più delle proprietà seguenti: maggiore leggerezza, elevata temperatura di impiego, maggiore stabilità chimica nei confronti dell'ambiente di servizio, specialmente ad elevata temperatura, maggiore resistenza all'usura, minore coefficiente di attrito.

In particolare i materiali compositi a matrice ceramica (CMC) rappresentano il segmento più nuovo nel panorama dei ceramici avanzati: mentre per i ceramici monolitici si ipotizza una crescita entro il 2000 pari a circa l'8%/anno, per i CMC si ritiene che la crescita si attesterà intorno al 13-14%/anno.

In tale mercato la maggiore rilevanza avranno i CMC rinforzati con fibre; in questo senso è significativa l'espansione del mercato delle fibre stesse (ad es. di carbonio): 1,6 MECU nel 1980, 22 MECU nel 1990 e 56 MECU attualmente. Una stima del MITI giapponese prevede per i ceramici avanzati un mercato da 170 GECU nel 2000.

I CMC sono stati sviluppati ed applicati con successo dall'industria aerospaziale in USA ed in Europa per impieghi ad altissime temperature, in gran parte per operazioni di breve durata ed in atmosfera non eccessivamente aggressiva. Il fattore di merito che ne ha favorito l'impiego è rappresentato dai favorevoli rapporti peso/resistenza ed il fattore costo (elevato) non è stato determinante. E' ragionevole ritenere che la penetrazione di questi materiali, che in parte sta già avvenendo, in applicazioni industriali di tipo "capital intensive" determinerà uno sforzo importante tendente a rendere questi materiali più versatili e più economici con un approccio "total engineering" che non punti solo alle prestazioni.

Tale sforzo è già stato avviato da anni negli USA, dove aziende quali Du Pont Lanxide Composites, Textron Speciality Materials, Carborundum hanno compreso l'importanza di un trasferimento di tecnologie dal settore aerospaziale a quello dell'industria pesante ed hanno adeguato di conseguenza strutture organizzative (unità di business specifiche) e strategie (razionalizzazione dei processi ed alleanze con gli end-users). Lo stesso non è avvenuto in Europa, dove solo in tempi più recenti le principali aziende produttrici di materiali CMC (Aerospaziale, SEP, DASA) hanno compreso l'importanza della diversificazione rispetto ai settori aerospaziali civili e militari, questi ultimi due in particolari colpiti da forti crisi.

3.2 Le prospettive di mercato

Lo sviluppo dei materiali ceramici è un'area che vede un notevole impegno di ricerca in campo industriale in particolare per quanto riguarda le tecnologie di fabbricazione.

Lo stato delle conoscenze è sufficientemente avanzato nel complesso, anche se ovviamente si differenzia notevolmente in relazione ai differenti tipi di materiali e di tecnologie considerate.

Tra i materiali ceramici quelli sui quali si concentrano i maggiori sforzi sono il carburo di silicio, il nitruro di silicio, la zirconia parzialmente stabilizzata (PSZ), il SiAlON o l'allumina. Ma anche altri ceramici avanzati quali il carburo ed il nitruro di boro o più tradizionali quali la cordierite, potrebbero acquistare un ruolo di una certa importanza. L'applicazione su vasta scala di questi materiali è ancora oggi limitata da due barriere tecnologiche, più o meno comuni a tutti: la fragilità e l'affidabilità. Per risolvere il problema della fragilità le strade che vengono seguite attualmente sono molteplici, in parte rivolte al miglioramento del processo, così da ridurre il numero e la dimensione dei difetti, in parte rivolte al miglioramento della microstruttura così da aumentare la tenacità. A livello microstrutturale si opera in tre direzioni: progettazione della microstruttura, trasformazioni tenacizzanti, introduzione di rinforzi. I risultati fin qui conseguiti fanno sì che la tenacità oggi raggiungibile in una nuova ceramica sia circa doppia rispetto a quella di una ceramica monolitica con microstruttura tradizionale, tipo allumina.

Dal punto di vista tecnologico, alcuni di questi materiali vengono già impiegati, in produzioni a volte limitate, a volte di larga serie. Rotori di turbocompressori in nitruro di silicio vengono oggi prodotti in Giappone, negli USA e in Svezia, ma il problema per la loro larga commercializzazione è quello delle rete di produzione, attualmente dell'ordine del 25-30%. Discorso analogo vale per altri componenti per autoveicoli a benzina e diesel quali valvole, camere di precombustione, candele ad incandescenza, collettori di scarico. Altri impieghi in fase di espansione riguardano gli utensili da taglio, tenute meccaniche e parti resistenti all'usura, protesi ortopediche ed odontoiatriche, corazze antiproiettile.

I materiali compositi a matrice metallica sono metalli di basso peso specifico (leghe di alluminio, di magnesio o di titanio) rinforzati con fibre continue o con rinforzi discontinui (whiskers o particelle). Il maggiore sforzo è concentrato sui rinforzi di tipo ceramico. Sono state prese in considerazione le fibre continue (allumina, silice, boro, allumina-silice, zirconia, ossido di magnesio, mullite, nitruro di boro, carburo di boro, carburo di silicio, diboruro di titanio, allumina-anidride borica-silice, oltre a rinforzi di fibra di carbonio), i whiskers (carburo di silicio, allumina e nitruro di silicio) e le particelle (allumina, carburo di boro, di silicio, di titanio o di tungsteno). In confronto ai metalli, i compositi hanno maggiore rigidità e resistenza specifiche, sopportano temperature di esercizio più alte, hanno maggiore resistenza all'usura. Inoltre offrono la possibilità di commisurare i coefficienti di espansione termica e di conduttività termica. Tutte le proprietà elencate possono essere "ritagliate su misura" per una particolare applicazione. Gli svantaggi principali rispetto ai metalli sono, oltre al costo, una minore duttilità e tenacità.

Proprietà e costi diminuiscono passando dai compositi con fibra continua di carburo di silicio, allumina o boro, a quelli con whiskers di carburo di silicio, a quelli con fibra corta di allumina e silicato di alluminio, a quelli preparati con particelle di carburo di silicio. Questi ultimi compositi saranno, probabilmente, i primi ad essere disponibili sul mercato, mentre l'introduzione dei compositi a fibra continua dipende da significativi sviluppi per quanto riguarda la tecnologia di fabbricazione.

In futuro gli sviluppi della ricerca nell'area dei materiali termomeccanici riguarderanno prevedibilmente:

- per i materiali ceramici il superamento delle barriere relative a fragilità, affidabilità, comportamento in ambiente ostile;
- per i compositi a matrice metallica la soluzione dei problemi di interazione fibra/matrice e di intercambiabilità della matrice attraverso il ricorso alle tecniche di rivestimento; sull'effettivo rapporto costi/benefici e quindi sul grado di competitività non sono possibili previsioni

attendibili, molto dipenderà dalla entità della riduzione di costo raggiunta con la messa a punto dei processi di fabbricazione;

- per il settore dei rivestimenti la estensione dei campi di applicazione con l'introduzione di nuovi tipi di rivestimento e delle tecnologie ad essi relative, il miglioramento dei metodi di caratterizzazione dei difetti, lo sviluppo delle conoscenze sulla natura delle interazioni di interfaccia metalliche e ceramiche ed il miglioramento dei metodi di caratterizzazione dei difetti, il miglioramento della affidabilità e produttività dei processi di rivestimento, il miglioramento delle proprietà ed affidabilità dei rivestimenti, l'estensione dei campi di applicazione di processi e materiali, lo sviluppo di processi radicalmente innovativi per la deposizione in continuo ad alta produttività di materiali vari su nastri metallici.

L'introduzione dei nuovi materiali e la possibilità di scegliere tra materiali diversi per la fabbricazione di un componente permetterà di ottenere significativi vantaggi in termini di leggerezza delle strutture, vita in servizio dei componenti, risparmi di energia e di materiali strategici. Esempi e applicazioni a lungo termine comprendono il motore auto a turbina, il diesel avanzato, alcuni dispositivi elettrochimici come le celle a combustione, scambiatori di calore, turbine per propulsione aerea e per impianti fissi, strutture aerospaziali, robot, macchine operatrici ad alta velocità, assemblaggio di componenti elettronici per aerei avanzati e per veicoli spaziali, componenti di laser, elettrodi di semiconduttori di potenza, pozzi di calore, sistemi di conversione di energia magnetoidrodinamici, sistemi di immagazzinaggio e trasporto di idrogeno e componenti per reattori a fusione.

4. LE ATTIVITA' DI R&S

I materiali metallici impiegati nei processi ad alta temperatura, pur lavorando al limite delle loro capacità operative, rappresentano una limitazione nello sviluppo delle tecnologie avanzate di processo quali la conversione di energia da combustibili fossili, i processi petrolchimici e siderurgici, l'industria aerospaziale ed altri importanti settori industriali. La possibilità di operare a livelli di temperatura più elevati di quelli attualmente conseguibili, in ambienti per varia natura chimicamente aggressivi, costituirebbe un salto tecnologico capace di innovare e modernizzare gran parte delle installazioni industriali. Questa innovazione risulta alla portata della moderna tecnologia tenuto conto dei grandi progressi che si sono fatti negli ultimi tempi nello sviluppo di nuovi materiali ceramici ed in particolare dei materiali compositi a matrice ceramica (CMC), che accoppiano eccellenti proprietà meccaniche ad alta temperatura ad ottime proprietà di resistenza alla corrosione per una grande quantità di agenti aggressivi. I materiali ceramici massivi, ed in misura maggiore i compositi a matrice ceramica, si prestano particolarmente per un impiego in scambiatori di calore in grado di operare a temperature intorno ai 1500 °C nel campo della generazione e conservazione dell'energia. Infatti negli scambiatori di calore i materiali più esposti alle condizioni termiche sono quelli delle superfici di scambio e dei collettori e condotti lato-caldo. Mentre sui condotti (e sui collettori) lato-caldo è possibile intervenire con rivestimenti refrattari, le superfici di scambio termico devono necessariamente essere realizzate con materiali ad elevata conducibilità termica. Recentemente sono state sviluppate leghe metalliche in grado di resistere a temperature di 900-1000 °C notevolmente al di sotto delle possibilità di scambiatori di calore ceramici.

La possibilità di impiego dei materiali CMC quali materiali strutturali degli scambiatori di calore richiede tuttavia ancora un forte impegno di R&S allo scopo di affrontare le seguenti principali criticità:

- accrescerne la resistenza ad ossidazione/corrosione/erosione
- sviluppare tecnologie di tenuta in pressione (tubo-tubo e tubo-piastra)

- sviluppare tecniche di controllo non distruttivo
- diminuire i costi di produzione
- aumentare la riproducibilità e l'affidabilità
- produzione net-shape o near-net-shape
- aumentare la durata della vita
- disporre di standards di progettazione e di criteri di analisi

4.1 La situazione internazionale

In ambito internazionale le aspettative degli ultimi anni circa un generalizzato impiego dei materiali avanzati nei componenti industriali sono state in molti casi deluse e questo ha generato, da parte delle strutture finanziatrici, l'esigenza di finalizzare la ricerca concentrandola sulle applicazioni con maggior probabilità di successo.

Le problematiche complesse, multidisciplinari e vaste che lo studio dei materiali avanzati presenta fanno sì che l'intervento pubblico assuma una notevole importanza per il sostegno economico della ricerca in questo settore. La realtà del mondo giapponese, statunitense ed europea sono accomunate da questa caratteristica ed infatti i più grossi programmi di R&S, che comprendono anche la partecipazione di gruppi privati, sono di carattere pubblico.

In Giappone la struttura degli interventi è di tipo "top-down", in cui il Ministero dell'Industria e del Commercio Estero (MITI) è in grado di promuovere programmi di R&S ad ampio respiro ed orizzonte temporale ed in cui l'integrazione verticale ed orizzontale delle principali imprese permette di trasferire i risultati della ricerca in prodotti ed applicazioni di massa, aumentando in tal modo l'interesse industriale e promuovendo l'ulteriore finanziamento della ricerca.

Gli Stati Uniti, al contrario, affidano la diffusione dell'innovazione alle forze di mercato. Originariamente le commesse del Pentagono e della NASA garantivano fondi per la R&S di nuovi materiali, mentre le attuali restrizioni del bilancio della Difesa - dovute al termine della "guerra fredda" - la limitazione posta ai programmi spaziali e la pressione di problemi ecologici ai quali dover dare una rapida soluzione hanno determinato un rallentamento negli sforzi di ricerca di base.

In Europa, prendendo come esempio la Germania, si trova una struttura di tipo misto: la grande tradizione della chimica e l'attitudine verso i nuovi materiali sostenuta dall'imponente potenza del settore finanziario delle grandi imprese industriali (come ad esempio quelle automobilistiche) riescono a condizionare ed indirizzare le decisioni del Governo a favore dell'innovazione e della qualità. Questo spiega la necessità di un forte collegamento tra ricerca, produttori, utilizzatori e governi per il successo delle nuove tecnologie.

Nel seguito vengono analizzate con maggior dettaglio le varie situazioni.

Stati Uniti

Tradizionalmente gli USA detengono una indiscussa supremazia in quasi tutti i campi dei materiali avanzati e tale superiorità si manterrà probabilmente inalterata anche nel prossimo decennio. Per molti anni i programmi federali di investimento in R&S sui materiali avanzati hanno preso spunto dalle attività nel campo nucleare e militare. Negli anni '60 l'interesse per i materiali avanzati ha coinvolto anche settori come quello aerospaziale e delle energie alternative. Negli ultimi anni la necessità di un approccio più completo, in grado di fornire le conoscenze indispensabili per la competitività su un mercato internazionale dei nuovi materiali in rapido sviluppo, ha portato alla realizzazione di programmi di ricerca federali a più ampio respiro.

Oggi negli Stati Uniti lo strumento principale per il coordinamento dei progetti di ricerca e lo sviluppo dei materiali avanzati è l' "Advanced Materials Processing Program" (AMPP). Nato nel 1990 sotto l'egida del Federal Coordinating Council for Science, Engineering and Technology (FCCSET), l'AMPP ha come finalità il miglioramento della qualità della vita, della sicurezza, della produttività industriale e della crescita economica. Per quanto riguarda in particolare i materiali ceramici, l'AMPP ha in corso un progetto con un finanziamento annuo di circa 150 milioni di \$.

Giappone

In alcuni campi il Giappone ha già colmato il ritardo nei confronti degli Stati Uniti o si sta allineando con una rapidità sorprendente; dove il Giappone è leader indiscusso per la ricerca e le tecnologie sui materiali avanzati è il campo elettronico. Il Giappone ha iniziato ad investire su ricerche comprendenti materiali avanzati fin dal 1961 quando promosse, tramite il MITI, un programma di vasta scala sulla R&S delle tecnologie industriali avanzate.

Attualmente i programmi in corso sulla scienza dei nuovi materiali, che si sviluppano in stretta collaborazione con il mondo industriale, con investimenti che nel solo anno 1992 hanno superato 17 miliardi di yen (136 milioni di \$), sono almeno una dozzina.

La gran parte delle attività di ricerca sui materiali è svolta a Tsukuba, da sei centri gestiti dalla Agency of Industrial Science and Technology (AIST): Electrotechnical Lab (ETL), Mechanical Engineering Lab (MEL), National Chemical Laboratory for Industry, Industrial Products Research Institute for Polymers and Textiles, National Laboratory of Metrology. Durante il 1991 il governo giapponese ha speso più di 300 milioni di \$ per la ricerca sui materiali. L'economia giapponese è diventata la seconda nel mondo, le industrie giapponesi detengono posizioni di dominio incontrastato in molte aree e la tendenza delle politiche governative è quella di spostare l'attenzione dalle tecnologie di larga scala e dell'industria pesante a quelle leggere e compatte, nelle quali i materiali avanzati giocano un ruolo cruciale. Nel luglio 1991 uno studio governativo ha individuato il ruolo fondamentale di 101 tecnologie alle quali sono legate l'economia ed il benessere della società nei prossimi cinquant'anni. Di queste, sedici riguardano i materiali avanzati: in cinque di queste il Giappone si considera follower: ceramici per turbogas, photochemical burning hole memory, plastiche rinforzate al C, compositi a matrice metallica e compositi C-C; in quattro tecnologie detiene invece la leadership: materiali superconduttori, vetri ottici non lineari, leghe metalliche per lo stoccaggio dell'idrogeno e materiali magnetici.

Europa

I Paesi guida nella ricerca sui materiali avanzati in Europa sono la Germania, l'Inghilterra e la Francia. Il primo con strutture di ricerca come il Max Planck Institute di Stuttgart e con industrie direttamente coinvolte come la BMW e la MBB nel campo automobilistico, e la BASF in quello chimico. Il secondo con centri di ricerca specializzati, quali lo "High-Performance Materials Research Center" dell'Università di Birmingham e la complessa struttura di ricerca che fa capo ai vari dipartimenti governativi ed industrie come la BP, la ICI o la CBL. La Francia, infine, sia con i centri che fanno capo ai vari ministeri ed agenzie sia con aziende fortemente orientate nel settore della ricerca come Du Pont e ACB. A questi si aggiungono centri di prova per lo scambio termico ad elevata temperatura come il GRETH di Grenoble. Per quanto riguarda l'industria italiana si può affermare che questa è scarsamente presente nella produzione di nuovi materiali, mentre forti sono le esigenze delle industrie utilizzatrici.

Da diversi anni la ricerca e lo sviluppo tecnologico occupano un posto rilevante nella vita politica ed economico dei Paesi della UE: i cicli produttivi ed innovativi sempre più brevi, i costi di R&S in rapido aumento e l'interdipendenza mondiale dei settori ad alta tecnologia, infatti, non permettono più di garantire la concorrenzialità e capacità di esportazione delle nostre economie nel quadro dei tradizionali sistemi nazionali. In questo contesto l'UE svolge un ruolo

cruciale: nel corso degli ultimi dieci anni essa è diventata la sede naturale di una politica comune di R&S tecnologica, cui la riforma dei trattati introdotta dall'Atto Unico europeo del 1987 ha fornito nuovo fondamento e vigore.

Il Programma Quadro per le azioni comunitarie nel settore della ricerca e dello sviluppo tecnologico costituisce la base e lo strumento principale della politica comunitaria di R&S; fissando gli obiettivi, le priorità e le condizioni di intervento finanziario della Comunità per un periodo di cinque anni circa e permettendo così un'efficace programmazione della politica comunitaria nel settore. Lasciando coincidere in parte i periodi coperti dalla successione del PQ, la Commissione ha introdotto il principio della programmazione flessibile, per poter seguire meglio il ritmo dell'evoluzione tecnologica. Attualmente è in vigore il 4° Programma Quadro delle azioni di Ricerca e Sviluppo Tecnologico e di Dimostrazione dell'Unione Europea (adottato il 20 aprile 1994), che è stato suddiviso in azioni prioritarie, tra cui la realizzazione di programmi di ricerca e sviluppo che promuovano la collaborazione tra imprese, centri di ricerca ed università. In tale azione, che copre gran parte delle attività comunitarie nel campo della R&S, rientrano le azioni di ricerca e dimostrazione nel settore delle energie non-nucleari con particolare attenzione anche alle tecnologie dei componenti per i cicli energetici avanzati, e le tecnologie industriali (materiali e loro lavorazioni). La strategia di base consiste nella partecipazione di gruppi internazionali, di organizzazioni, centri di ricerca, università ed imprese nonché dei Centri Comuni di Ricerca (CCR), che partecipano a tutte le attività per le quali possiedono competenze specifiche.

La dotazione finanziaria complessiva del 4° PQ è stata fissata in 12.300 MECU con una riserva di attribuzione di ulteriori 700 MECU, con ripartizione tra le varie azioni.

Il programma specifico di R&S nel settore delle energie non-nucleari (Joule-Thermie) ha come obiettivi prioritari:

- il miglioramento della ricerca energetica
- la riduzione dell'impatto ambientale associato alla produzione ed all'impiego di energia, con riguardo particolare alle emissioni di CO₂
- il rafforzamento delle basi tecnologiche dell'industria energetica europea

In questo contesto sono previste alcune linee d'intervento nelle quali lo sviluppo degli scambiatori di calore ad alta temperatura trova ampio recepimento:

- l'uso razionale dell'energia nei processi industriali
- lo sviluppo dei cicli avanzati per la produzione di energia
- la produzione di energia da biomasse e rifiuti.

Per quel che riguarda il programma di ricerca relativo alle Tecnologie Industriali e dei Materiali (ex-BRITE-EURAM), pur mantenendo il suo carattere multisettoriale ed aperto a diversi tipi di attività industriali, è essenzialmente centrato su tre obiettivi:

1. Breve termine:

ricerca per l'adattamento delle tecnologie esistenti e sviluppo di nuove tecnologie per aumentare la competitività dei settori aventi un più debole livello tecnologico.

2. Medio termine:

ricerca concentrata sulle industrie che già sviluppano tecnologie e strategie innovative per migliorare l'impiego delle risorse umane e per ridurre gli effetti nocivi della produzione sull'ambiente.

3. Lungo termine:

ricerca concentrata su nuove tecnologie di produzione e di concezione di nuovi prodotti per creare nuove industrie o mercati in un contesto di sviluppo sostenibile.

Il contenuto scientifico del programma è basato sulle tecnologie di cui ha bisogno l'industria europea e legate alle fasi critiche dei sistemi di produzione ed alla qualità dei prodotti.

Le attività di ricerca per l'attuazione del programma sono definite secondo tre linee di azione:

- attività a carattere industriale, incentrate su obiettivi prioritari di grande importanza strategica per l'industria europea e che tengano conto delle esigenze degli utilizzatori;
- attività eseguite dalle PMI;
- attività necessarie allo sviluppo ed alla diffusione delle conoscenze.

4.2 La situazione italiana

L'esigenza e l'opportunità di avviare progetti di ricerca nel settore dei materiali per componenti e prodotti avanzati sostenuti a livello pubblico è stata avvertita già intorno alla metà degli anni '70 in molti Paesi industrializzati.

La diversificazione delle applicazioni ha portato sempre più verso la suddivisione dei materiali per tipologie di impiego, così come del resto le varie competenze necessarie per la progettazione e la costruzione dei diversi prodotti ha comportato la specializzazione dell'industria in una molteplicità di settori. Ciascun settore è sorto, si è sviluppato e caratterizzato insieme alle classi di materiali di cui faceva uso per la realizzazione dei propri prodotti. Non solo, ma si può affermare che è in relazione ai materiali tipici di ciascun settore industriale che l'ingegneria ha sviluppato le proprie metodologie di progettazione, le tecnologie di lavorazione, i controlli di produzione, i sistemi di qualificazione, le normative, etc..

In Italia soltanto nel 1983, per iniziativa del Comitato nazionale di Consulenza per le Scienze Chimiche, fu possibile varare lo studio di prefattibilità di un Progetto Finalizzato sui nuovi materiali, sfociato nello studio di fattibilità, approvato nel 1986 ed avviato esecutivamente nel 1989.

Nel frattempo, contando sull'organizzazione creatasi nell'ambito delle attività preparatorie del Progetto Finalizzato "Materiali Speciali per Tecnologie Avanzate" I, anche il Ministero per la Ricerca Scientifica e Tecnologica (MURST), preso atto del ritardo sempre più pesante che il nostro Paese andava accumulando sull'innovazione tecnologica, penalizzata dalle frammentazioni delle competenze e delle risorse esistenti nel campo dei materiali, varava un comitato per l'elaborazione del Piano Nazionale del settore (il Piano Nazionale sui Materiali Innovativi Avanzati - PNMIA), approvato nell'ottobre 1989 e da cui è scaturito un Programma Nazionale di Ricerca, i cui temi sono stati banditi nel giugno 1990. Nell'ambito del PNMIA è stato avviato nel 1995 un progetto sulla tematica degli scambiatori ceramici basati su materiali di tipo monolitico.

Per quanto riguarda i materiali compositi a matrice ceramica (CMC) il quadro nazionale è fortemente arretrato: non esiste infatti in Italia un solo produttore di componenti per applicazioni industriali realizzati in materiali CMC; il promettente scenario di mercato futuro sta stimolando centri di ricerca industriali e PMI ad avviare programmi di sviluppo in modo da evitare un ritardo tecnologico del Paese con significative conseguenze sul piano della competitività internazionale.

Nel campo dei materiali, l'ENEA ha selezionato alcune aree particolari che giudica di grande importanza strategica e nelle quali ha competenze consolidate, per un suo intervento diretto di ricerca, mentre partecipa a ricerche su altre aree importanti dei materiali attraverso centri e

consorzi (CAMPEC, CNRSM) cui contribuisce con competenze di carattere più orizzontale, anche a seguito dell'acquisizione ed incorporazione in ambito ENEA nel 1994 della società TEMAV S.p.A. dal Gruppo ENI.

Per quanto riguarda in particolare i materiali ceramici monolitici e compositi, che sono alla base dello sviluppo degli scambiatori ceramici di calore, attività di R&S sono svolte attualmente presso l'IRTEC-CNR di Faenza, presso l'ENEA (Casaccia e Faenza) e presso alcune sedi universitarie tra le quali Roma, Trieste, Bologna e Modena. Attività di trasferimento e servizio sono state da tempo avviate dall'Agenzia Polo Ceramico; anche ISRIM ed alcuni consorzi Città Ricerche hanno tra le loro finalità attività analoghe.

A livello industriale attualmente si riscontra una situazione di "attesa" da parte dei grandi gruppi industriali.

- ENEL, oltre ad avere capacità di caratterizzazione "completa" di materiali ceramici massivi, ha anche realizzato e qualificato un "mock-up" di scambiatore da 16 tubi in collaborazione con il CISE; attualmente partecipa ad alcuni Progetti comunitari insieme ad Ansaldo tramite il Centro Ricerche Termiche di Pisa e l'interesse su tali tematiche dovrebbe essere mantenuto anche in futuro nonostante gli interventi riorganizzativi operati nel settore della R&S.
- CSM, nonostante le difficoltà derivanti dal processo di riorganizzazione interno, svolge da anni attività di R&S su materiali e componenti ceramici adatti ad impieghi negli impianti avanzati di produzione dell'acciaio, di produzione dell'energia, negli scambiatori di calore, nella lavorazione e trasformazione dei materiali (matrici, utensili speciali).
- ANSALDO RICERCHE svolge attività di ricerche finalizzate all'applicazione dei ceramici avanzati in componenti quali turbine a gas, scambiatori di calore ad alta temperatura e celle a combustibile e dispone anche di un banco prova per la prova di scambiatori ad alta temperatura, unitamente a significative esperienze di prove sperimentali sui materiali più avanzati ed a vari studi di progetto.

Emerge inoltre un crescente interesse da parte di piccole e medie imprese che puntano a nicchie di mercato estremamente specializzate e ad elevato contenuto tecnologico.

E' migliorata anche la partecipazione delle aziende italiane ai Programmi comunitari. In particolare si segnalano le iniziative intraprese da ANSALDO RICERCHE negli ultimi anni che hanno condotto alla creazione di un gruppo di interesse europeo formato da circa 40 partners, comprendente grandi industrie, piccole e medie imprese, centri di ricerca, impegnate sul fronte dello sviluppo dell'ingegneria e della manifattura del componente scambiatore ed alla presentazione di diversi progetti di ricerca insieme ad altre organizzazioni operanti nel settore. In particolare si segnalano due progetti nei quali è impegnato anche il Dipartimento Energia dell'ENEA:

- Progetto BRITE sullo sviluppo di tubi ceramici in CMC
- Progetto JOULE sul design dello scambiatore

Recentemente ANSALDO RICERCHE, congiuntamente ad ENEA, CSM, ENEL, PASTIS CNRSM, ENIRICERCHE ed Università di Lecce, ha presentato al MURST una proposta di Programma Nazionale Scambiatore di Calore Ceramico per Alta Temperatura. Infine nel 1995 è stato presentato dal CNR uno studio di fattibilità per l'avvio di un Progetto Finalizzato Materiali Speciali per Tecnologie Avanzate II dove notevole spazio verrebbe riservato ai ceramici termomeccanici per impieghi energetici.

5. L'IMPEGNO DELL'ENEA

Una strategia di attenzione sullo sviluppo degli scambiatori di calore ad alta temperatura è stata avviata fin dal 1987 nell'ambito del Programma per lo sviluppo degli impianti di generazione magnetofluidodinamica (MHD), promosso dal Dipartimento Energia in collaborazione con ANSALDO, FRANCO TOSI, SNAMPROGETTI ed altre università e centri di ricerca nazionali. Le attività svolte nel corso del Programma MHD hanno consentito lo sviluppo di una serie di competenze ed attrezzature sperimentali di rilevante interesse scientifico in grado di confrontarsi ed integrarsi con i principali gruppi di ricerca attualmente impegnati in Europa nello sviluppo degli scambiatori ad alta temperatura.

Il Dipartimento Energia dispone in particolare delle seguenti capacità di R&S nell'ambito della Divisione Ingegneria:

- analisi sul trasferimento del calore con impiego di attrezzature sperimentali e qualificati codici termofluidodinamici
- analisi termomeccanica dei componenti con impiego dei più avanzati codici agli elementi finiti attualmente disponibili
- qualifica di materiali in condizioni di elevata aggressività chimico-fisica con esecuzione di controlli non distruttivi pre e post-prova.

Per quest'ultima opzione è in particolare disponibile presso il Centro di Ricerche della Casaccia un'importante attrezzatura sperimentale denominata MICOS (Multipurpose Installation for COmbustion Studies). L'impianto, che è stato inizialmente progettato per raggiungere temperature di fiamma dell'ordine dei 3000 °C per la qualifica degli elettrodi ceramici MHD, successivamente è stato modificato per operare anche a temperature relativamente più basse comprese tra 800 e 1500 °C. Esso dispone di una potenza termica generata dalla combustione di tetrene ed ossigeno di 300 kWt corrispondenti a 258.000 Kcal/h ed è equipaggiato di un bruciatore a miscelazione esterna e di una camera di combustione per il contenimento della fiamma ed il convogliamento dei gas di combustione verso la camera di prova. Completano l'impianto la strumentazione del treno caldo per il rilievo di temperature e pressioni, il sistema di regolazione e controllo PROTRONIC ed il sistema di acquisizione dati. In Fig.9 è illustrato uno schema dell'impianto MICOS.

MICOS consente l'effettuazione di prove su materiali e componenti (ad es. tubi di scambiatori, palette di turbina, etc.) destinati ad operare in ambienti caratterizzati da elevate temperature ed aggressività chimico-fisica (erosione, ossidazione, corrosione). In particolare sono possibili le seguenti prove:

- erosione a caldo
- ciclaggio termico
- resistenza a stress termico
- scambio termico ad elevata temperatura
- valutazione dei flussi termici.

Durante le prove possono essere acquisiti e controllati tutti i parametri di prova ritenuti significativi ai fini della prova stessa secondo specifiche concordate con il committente. Inoltre prima e dopo le prove i materiali possono essere sottoposti ad esami di tipo non distruttivo (visivo, rugosità, ultrasuoni, metallografici, etc.) presso i laboratori di supporto dell'ENEA allo scopo di certificare in maniera oggettiva le prove effettuate.

Il Dipartimento Energia è attualmente impegnato in due iniziative nell'ambito dei Programmi comunitari riguardanti lo sviluppo degli scambiatori di calore ad alta temperatura:

- lo sviluppo di tubi ceramici per scambiatori di calore destinati ad operare in ambienti fortemente aggressivi (BRITE-EURAM 1992, budget: 3.360 kECU, coordinatore italiano ANSALDO RICERCHE): nell'ambito di questo Progetto la Divisione Ingegneria ha utilizzato l'impianto MICOS rilevando sperimentalmente il danno da erosione a caldo sia con il metodo ponderometrico che con quello volumetrico;
- il progetto, la costruzione e la prova sperimentale di un prototipo di scambiatore di calore a tubi ceramici per impieghi in cicli energetici ed in ambienti industriali (JOULE 1996, budget: 1.470 kECU, coordinatore ANSALDO RICERCHE).

Nel campo dei materiali il Dipartimento Innovazione dell'ENEA ha selezionato alcune aree particolari (Tab. 3) che giudica di grande importanza strategica e nelle quali il Dipartimento ha competenze consolidate, per un suo intervento diretto di ricerca, con il contributo di conoscenze di carattere più orizzontale, anche a seguito dell'acquisizione da parte dell'ENEA nel 1994 della società TEMAV S.p.A. dal Gruppo ENI. In particolare il Centro Nuovi Materiali di Faenza dispone di rilevanti mezzi strumentali e competenze per lo svolgimento di attività di R&S sugli scambiatori ceramici, quali:

- caratterizzazione meccanica
- controlli distruttivi e non distruttivi
- testing
- sviluppo di tecnologie ceramiche per la produzione di polveri.

Il Dipartimento Innovazione ha inoltre avviato significative collaborazioni con l'IRTEC-CNR di Faenza e l'Agenzia Polo Ceramico per il trasferimento e lo sviluppo di tecnologie. Esso inoltre partecipa ad iniziative comunitarie in collaborazione con ANSALDO RICERCHE nell'ambito del Programma BRITE-EURAM.

6. CONCLUSIONI

Analizzando i risultati ottenuti dalle varie iniziative avviate a livello nazionale nel settore dei ceramici avanzati, si è evidenziata una relazione diretta tra l'incremento di ricerca interna industriale e la capacità di assorbire i risultati della ricerca svolta nei centri pubblici e nelle università sulle tematiche individuate.

Si sono pertanto individuate le seguenti ricadute:

- la formazione di esperti inseriti nella realtà industriale;
- la definizione di proposte di intervento nel settore dei materiali sia innovativi che tradizionali;
- la definizione di strategie di trasferimento tecnologico stabili fra ricerca pubblica e ricerca industriale, con la partecipazione a programmi di respiro internazionale, quali il Programma europeo BRITE-EURAM, programma di tipo orizzontale e quindi adatto per le innovazioni produttive di tutti i settori industriali, ed il Programma JOULE-THERMIE sulle energie non-nucleari.

In particolare i materiali innovativi avanzati hanno acquisito un ruolo centrale per lo sviluppo industriale. Settori divenuti ormai maturi hanno potuto recuperare competitività, mentre settori altamente innovativi hanno potuto disporre di materiali capaci di garantire il superamento degli attuali limiti chimici e fisici. Il "sistema ricerca" del nostro Paese presenta, nel settore in esame, un buon potenziale per lo sviluppo di nuove iniziative e le linee di intervento individuate devono tenere in buon conto il costante e costruttivo confronto di esperienze esistenti tra università, enti di ricerca ed industria.

Queste azioni sono state avviate coinvolgendo nei loro specifici aspetti le principali componenti scientifiche ed economiche, con l'obiettivo di ridurre eventuali carenze attraverso un'azione sinergica tra le attività di ricerca svolte da imprese, enti pubblici ed università. Ciò anche per poter svolgere un più significativo ruolo nel difficile contesto di integrazione europea e di competitività internazionale particolarmente forte specie nei confronti dei Paesi a maggiore sviluppo tecnologico, quali Stati Uniti e Giappone, che è particolarmente attivo nel settore degli scambiatori di calore avanzati.

Caratteristica negativa della situazione italiana è tuttavia la notevole frammentazione dei gruppi di ricerca pubblica che difficilmente riescono a raggiungere una dimensione superiore a quella critica; inoltre una situazione così parcellizzata favorisce il fiorire di attività estremamente specifiche e prive in genere dei raccordi interdisciplinari necessari allo sviluppo di ricerche a vasto respiro e di applicabilità tecnologica. Questo aspetto risulta particolarmente penalizzante nello sviluppo di componenti complessi quali gli scambiatori di calore che richiedono il concorso e l'integrazione di diverse competenze. Impatti positivi possono derivare dall'intensificazione della partecipazione dei principali operatori ai Programmi comunitari, che, per definizione, richiedono contributi significativi da parte di una pluralità di attori, quali: tecnologi, progettisti, utilizzatori e sperimentatori.

In tale contesto si inquadra l'intervento dell'ENEA che, attraverso l'impegno coordinato dei Dipartimenti Energia ed Innovazione, è in grado di integrare competenze e capacità sperimentali nell'ambito dell'intero ciclo di sviluppo degli scambiatori di calore avanzati, che va dallo sviluppo dei processi di fabbricazione delle polveri alla qualifica sperimentale ad alta temperatura dei componenti, passando per la progettazione e l'analisi termofluidodinamica, che risultano essere fasi determinanti nell'ambito dell'intero ciclo. Tutto questo può trovare adeguati raccordi sia con la realtà industriale italiana più qualificata, peraltro limitata a pochi ma rilevanti operatori, sia con le attuali finalità strategiche dell'ENEL che, nonostante la riorganizzazione in atto nel settore R&S, ha più volte ribadito il suo interesse nello sviluppo di questi componenti come indispensabile premessa per l'impiego di cicli avanzati ad elevato rendimento.

Nei prossimi anni si assisterà infatti in Europa ad una rigida selezione dei gruppi di ricerca operanti nel settore e saranno privilegiate le organizzazioni in grado di garantire una "massa critica" ed una capacità di investigazione dei problemi adeguate alla complessità dell'obiettivo finale. In tale prospettiva occorre evitare iniziative isolate ad elevato rischio di marginalizzazione, ma perseguire la costruzione di progetti fin dall'inizio con un approccio complementare e sinergico con le altre iniziative avviate a livello nazionale e comunitario. A queste condizioni l'affermazione commerciale degli scambiatori ceramici ad alta temperatura può senz'altro rappresentare un'occasione per conseguire significativi vantaggi in termini di valenza industriale del Paese, di risparmio energetico, di impatto ambientale e, in generale, di occupazione.

Bibliografia

/1/ Progetto Finalizzato Materiali Speciali per Tecnologie Avanzate II - Studio di fattibilità, CNR, Novembre 1994

/2/ S. Consonni(1), F. Farina(2), E. Macchi(1) "Externally Fired Combined Cycles (EFCC) Part A: Thermodynamics and Technological issues". ASME Turbo-Expo, Birmingham, June 1996

/3/ S. Consonni(1), E. Macchi(1) "Externally Fired Combined Cycles (EFCC) Part B: Alternative configuration and cost projection". ASME Turbo-Expo, Birmingham, June 1996

/4/ C. Luzzatto(2), A. Morgana(2), S. Chaudourne(3), T. O'Doherty(4), G. Sorbie(5) "A new concept composite heat exchanger to be applied in high temperature industrial processes" - Energy efficiency in Industry, European Commission, Brussels, January 1995

/5/ T.F. Bechtel (6) "Fossil Fuels in a sustainable energy future", 2nd International Conference on Energy and Environment, Prague, November 1994

/6/ L. Falzetti(7), V. Lombardi(7), R. Pastorelli(7), B. Sardella(7) ed altri "Impianto MICOS - Test di erosione ad alta temperatura" , ENEA - Dipartimento Energia - Divisione Ingegneria, Aprile 1997

(1) Politecnico di Milano

(2) Ansaldo Ricerche, Genova

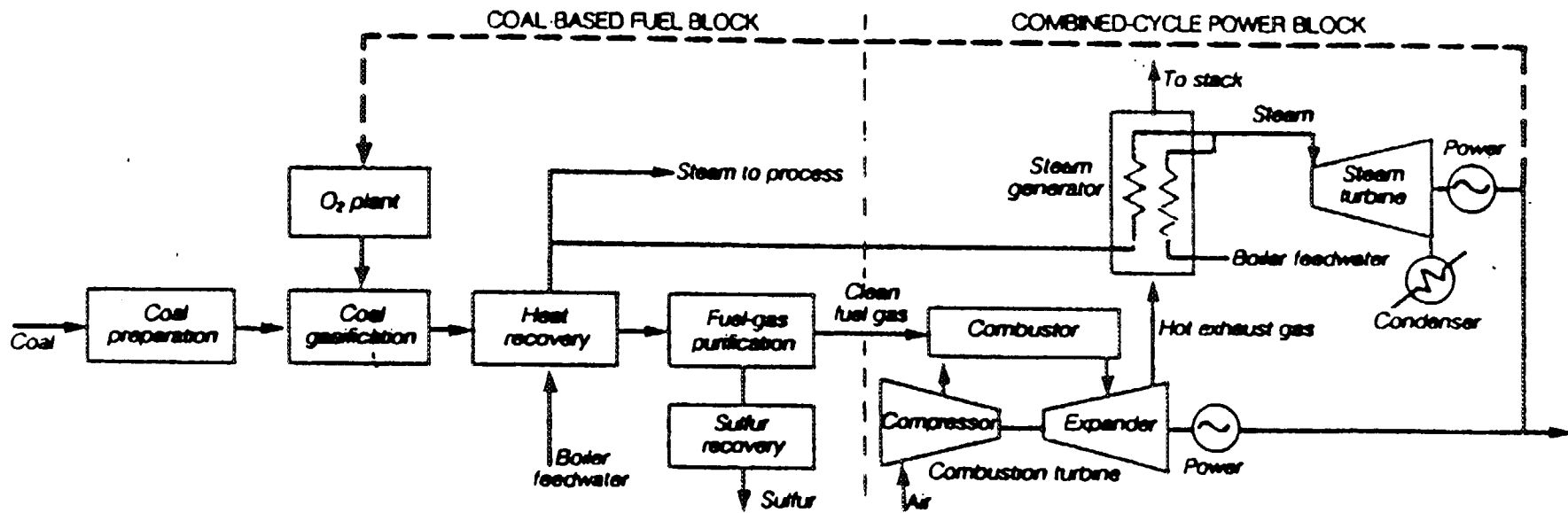
(3) Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble - GRETh

(4) University of Wales, Cardiff

(5) Babcock Mitsui, Glasgow

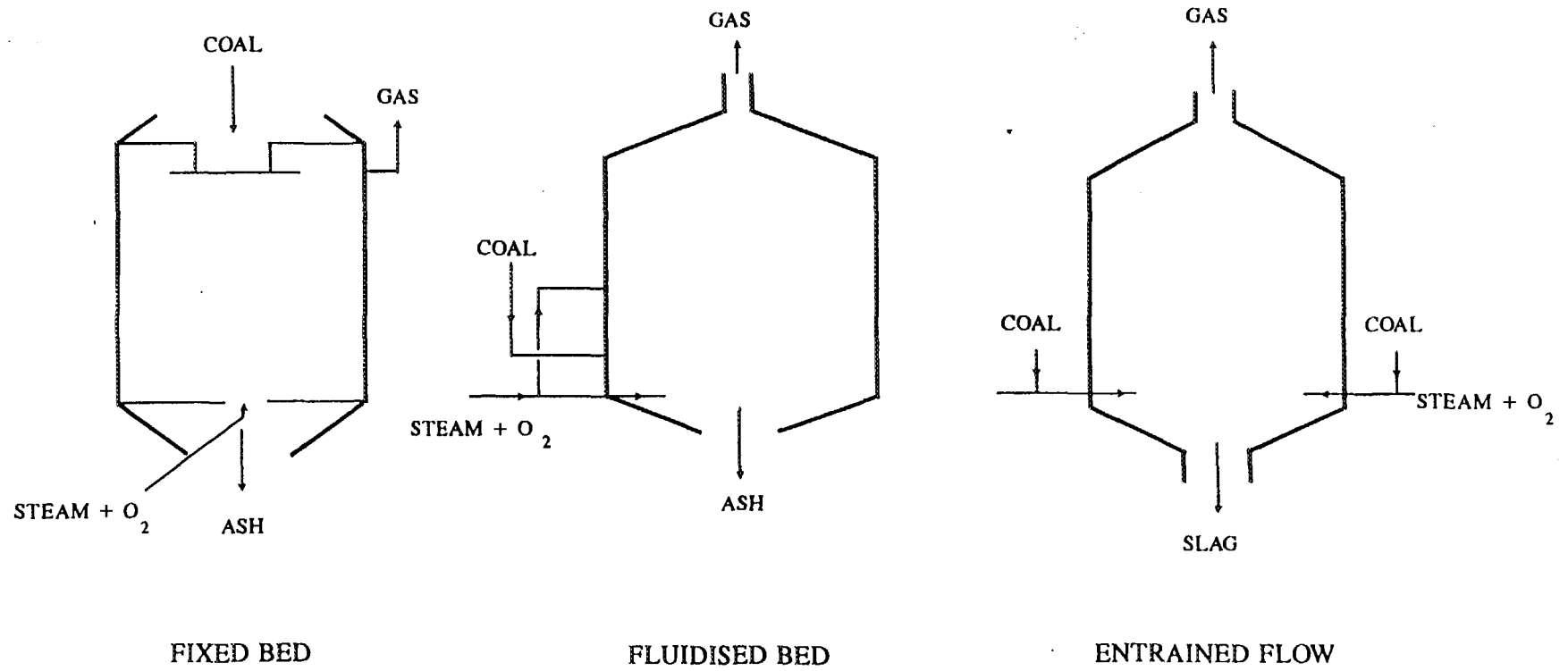
(6) Department of Energy, U.S.A.

(7) ENEA-Dipartimento Energia-Divisione Ingegneria, Roma



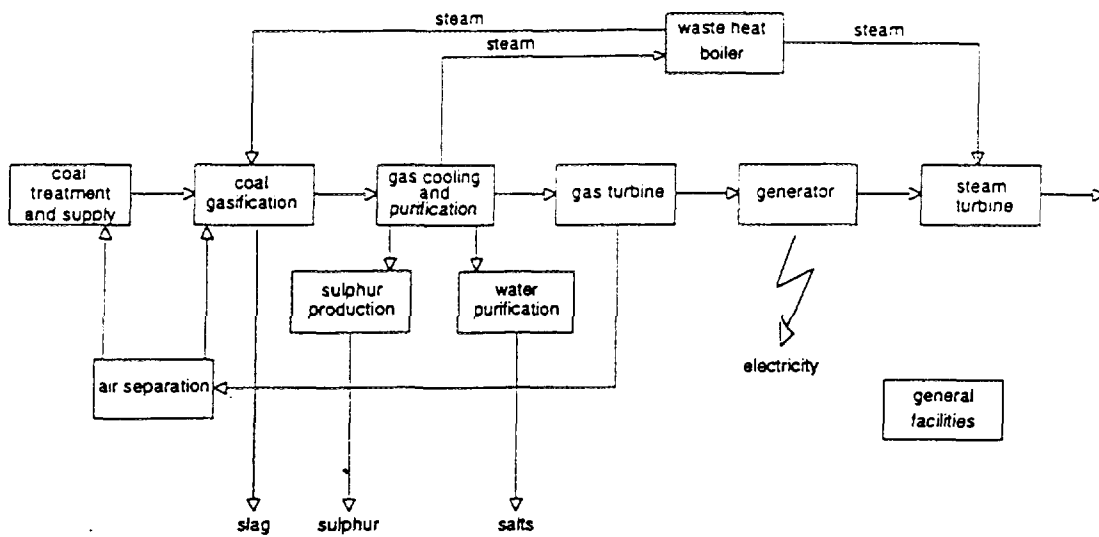
SCHEMATIC OF TYPICAL IGCC PLANT

FIG. 1

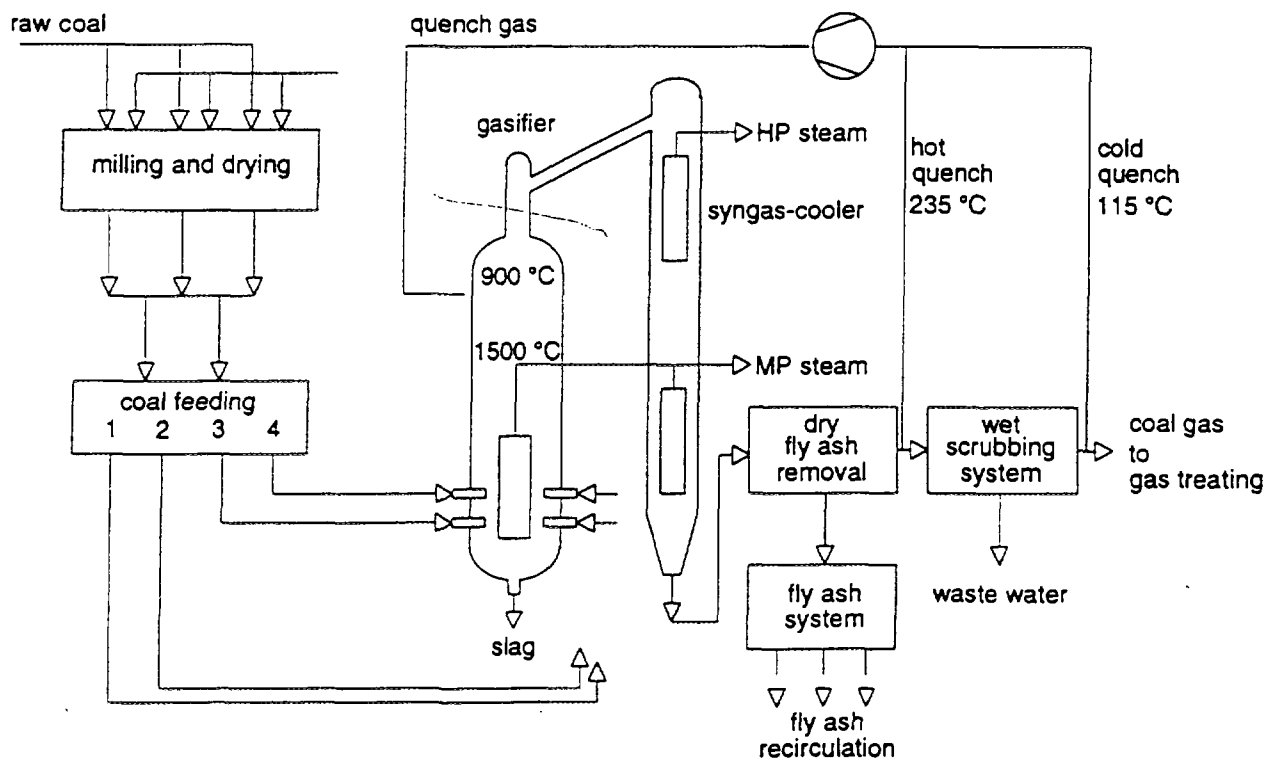


GENERAL FEATURES OF GASIFIER SYSTEMS.

FIG. 2



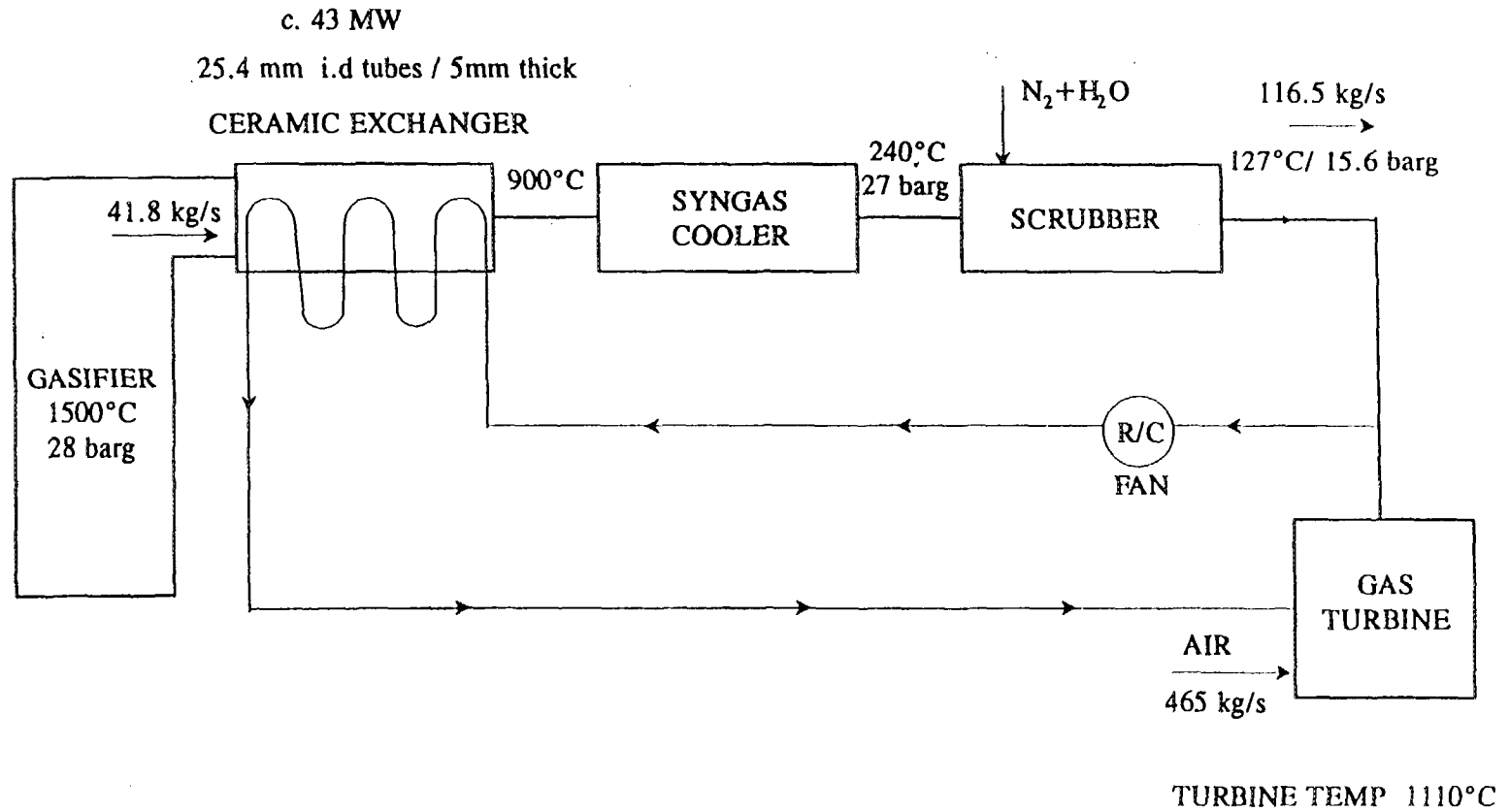
OVERALL BLOCK SCHEME



GASIFICATION BLOCK SCHEME

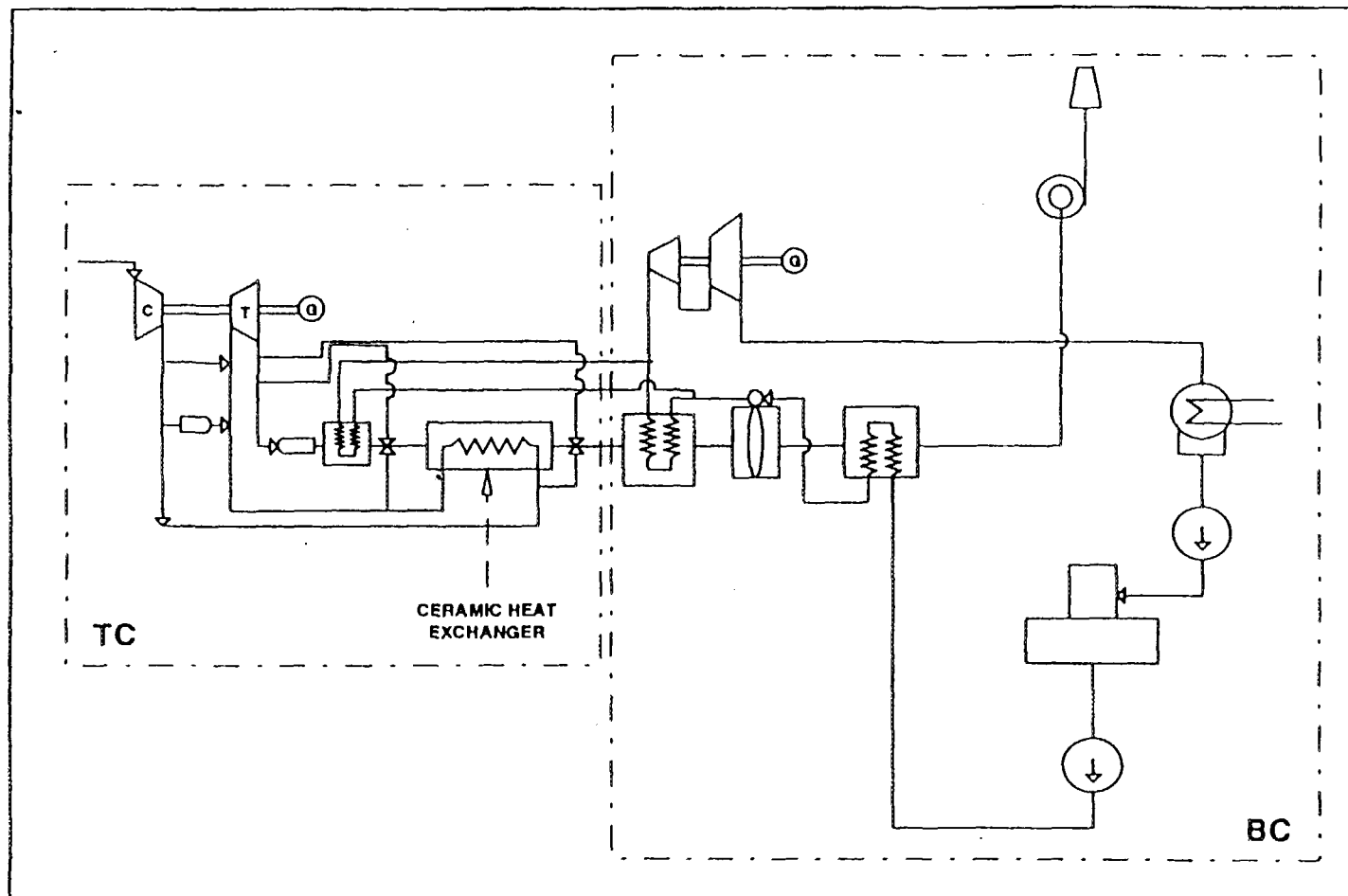
FIG. 3

Full load conditions.



PROPOSED MODIFIED SYSTEM WITH CERAMIC HEAT EXCHANGER

FIG. 4



GAS TURBINE:

Turbine inlet temperature 1140 °C
 Compression ratio 15.6
 Mass flow rate 183.7 kg/s

STEAM TURBINE:

Turbine inlet temperature 510 °C
 Turbine inlet pressure 90 bar

FIG. 5

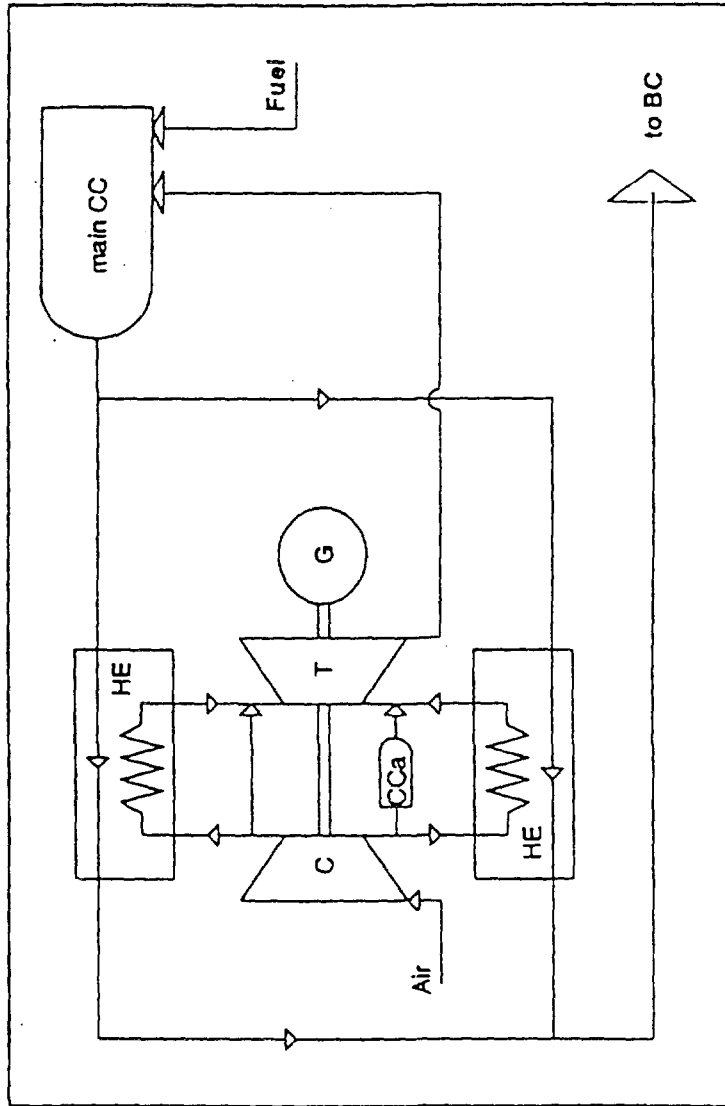


FIG. 6

Heat transferred	=	67.5 MW
Effectiveness	=	0.79
Number of passes for flue gas	=	3
Number of passes for air	=	1
Number of tube strings	=	24 × 37
Number of tubes per string	=	3 × 8
Length of a string	=	8 m
Number of tubes	=	21312
Length of each tube	=	1 m
Exchanging surface	=	6695 m ²

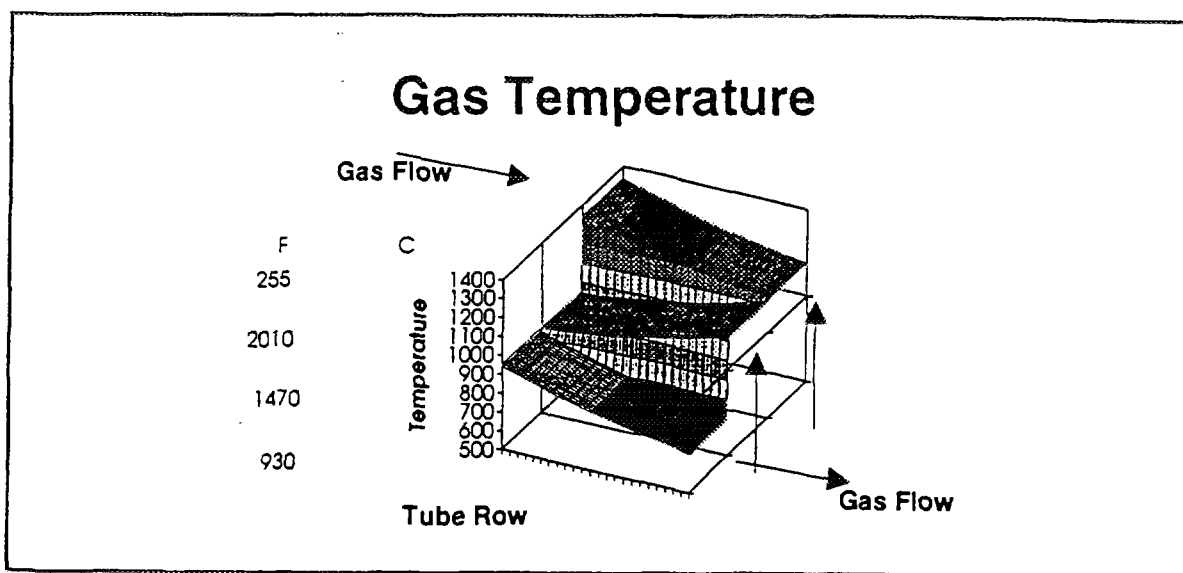
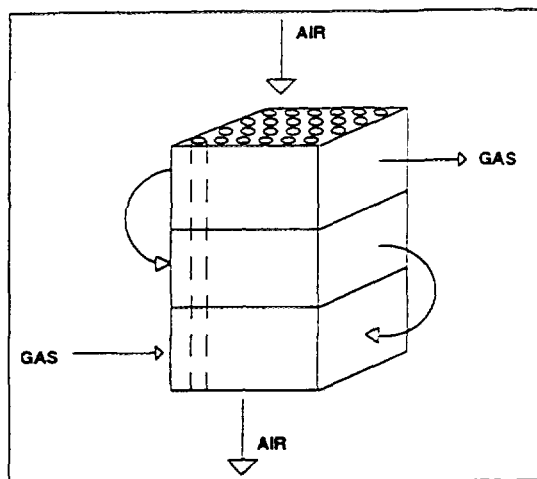


FIG. 7

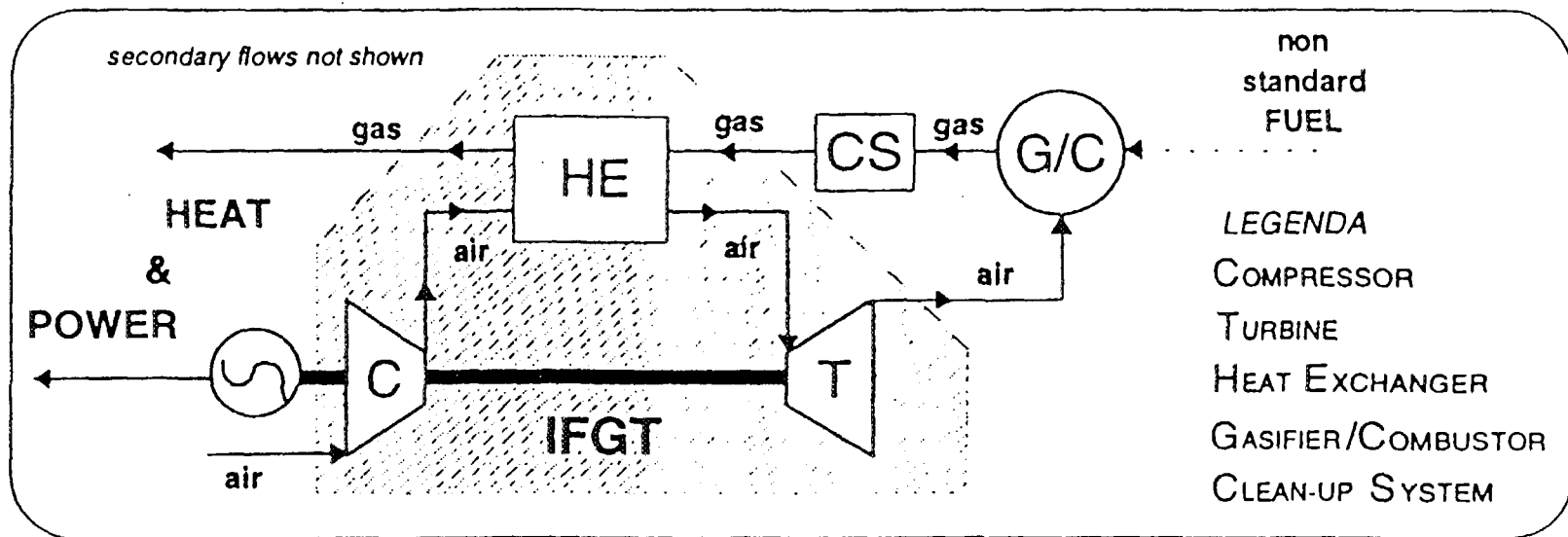
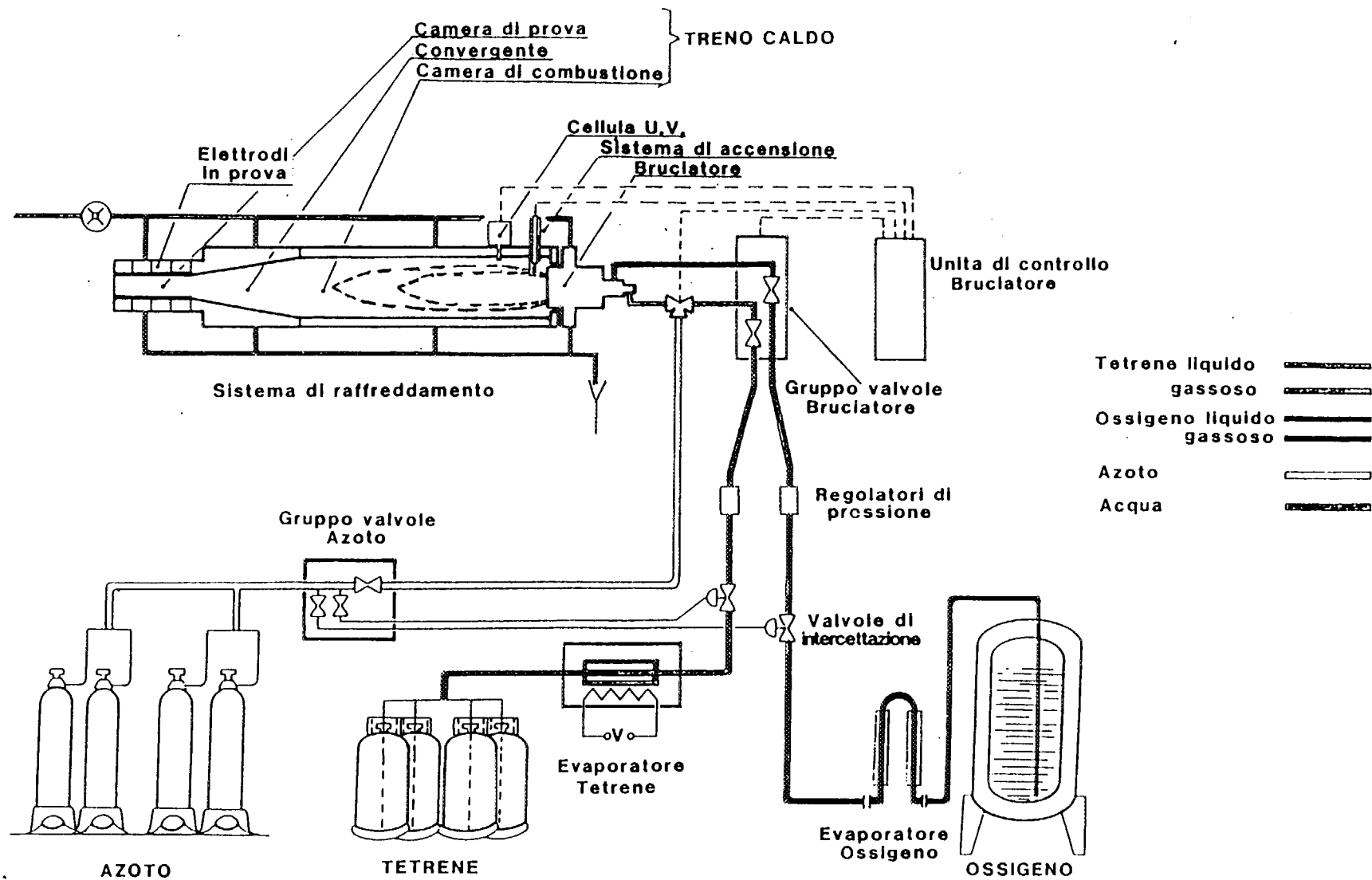


FIG. 8



IMPIANTO M.I.CO.S.

FIG. 9

GASIFICATION PROCESS	GASIFIER OPERATING CONDITIONS		AIR/OXYGEN BLOWN	TYPE OF SYSTEM	PLANT LOCATION/START-UP DATE/STATUS
	PRESSURE (bar g)	TEMPERATURE (°C)			
BRITISH GAS/LURGI	27	450 - 550	OXYGEN	MOVING BED	WESTFIELD ,SCOTLAND/1984/DEMONSTRATION
TAMPELLA U-GAS	23	870 - 1000	AIR	FLUIDISED BED	TOM'S CREEK, VIRGINIA/DEMONSTRATION
SHELL	28	1500	OXYGEN	ENTRAINED FLOW	BUGGENUM, NETHERLANDS/1993/COMMERCIAL
TEXACO	41.4	1200 - 1550	OXYGEN	ENTRAINED FLOW	COOLWATER, CALIFORNIA/1984/DEMONSTRATION
PRENFLO	26	1400	OXYGEN	ENTRAINED FLOW	LUBECK, GERMANY/DEMONSTRATION
DOW CHEMICALS	28	1370	OXYGEN	ENTRAINED FLOW	PLAQUEMINE, LOUISIANA/1987/COMMERCIAL DEMONSTRATION
VEW COAL CONVERSION	25	1600	AIR	ENTRAINED FLOW	WERNE, GERMANY/1984/PILOT

GASIFIER OPERATING CONDITIONS

Tab. 1

THERMAL INPUT

Thermal power input (HHV)	[MW]	=	188.5
Thermal power input (LHV)	[MW]	=	181.8

POWER GENERATED

Net Steam Turbine Output	[MW]	=	40.8
Net Gas Turbine Output	[MW]	=	49.4
Power required for ancillary equipment	[MW]	=	5.0
Net Plant Power Output	[MW]	=	85.2

EFFICIENCY

Net gas turbine efficiency (LHV)	[%]	=	33.6
Net plant efficiency (HHV)	[%]	=	45.2
Net plant efficiency (LHV)	[%]	=	46.9
Specific fuel consumption	[kg/kWh]	=	0.9

Tab. 2

MATERIALI INNOVATIVI			
Classe	Tipo	Proprietà Principali	Utilizzi Principali
Nuovi ceramici	Elettroceramici	Magnetiche, isolanti, piezoelettricità	Packages, condensatori, substrati
	Ceramici ingegneristici	Durezza, resistenza al calore e all'abrasione	Componenti da taglio e abrasione, turbine a gas, macchine termiche
	Bioceramici	Biocompatibilità, durezza, resistenza alla corrosione	Denti artificiali, protesi
	Materiali superconduttori	Resistenza elettrica nulla	Impieghi elettrici
Polimeri ad alte prestazioni	Plastica ingegneristica	Rigidità, resistenza al calore, resistenza al fuoco	Componenti per auto, elettriche ed elettroniche
	Membrane filtranti	Filtrazione con risparmio di energia	Reni artificiali, sistemi desalinizzanti
Nuovi metalli	Leghe amorfe; leghe ODS; leghe intermetalliche	Durezza, ferromagnetismo, resistenza alla corrosione	Trasformatori
	leghe a memoria di forma	Forma dipendente dalle temperature	Componenti elettroniche ed industriali
Compositi avanzati	Matrice polimerica	Rigidità, leggerezza, flessibilità, resistenza	Strutture aerospaziali, attrezzi sportivi, componenti industriali
	Altre matrici (CMC, MMC)	Rigidità, resistenza alla corrosione, protezione balistica	Veicoli spaziali, trasporti, impieghi militari

Fonte: ENEA

Tab. 3

Edito dall' **ENEA**
Unità Comunicazione e Informazione
Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Stampa: COM-Centro Stampa Tecnografico - C. R. Frascati

Finito di stampare nel mese di luglio 1997