

Incineration, an essential component of municipal solid waste management

Incenerimento, una componente essenziale della gestione dei rifiuti urbani

Paul H. Brunner

È realistico ipotizzare che la produzione dei rifiuti sarà in futuro maggiore di quella attuale. Una corretta gestione dei rifiuti deve mirare a proteggere l'uomo e l'ambiente, conservare le risorse e risolvere il problema senza rimandarlo nel tempo. Oggi la discarica costituisce la soluzione per l'80% dei casi mentre la priorità dovrebbe essere data al riciclo e ai moderni termovalorizzatori che costituiscono un mezzo eccellente ed ambientalmente sicuro di trattamento dei rifiuti.

The material throughput of affluent societies is very large: A modern urban citizen has an annual per capita turnover of around two hundred tons of materials [1]. These goods comprise water, air, fuel, construction materials, vehicles, as well as consumer goods. Based on the law of the conservation of matter, all materials entering the so-called anthroposphere either must be stored in the anthroposphere, or must leave it as off-products or emissions; they cannot “disappear”. Since products have limited residence times in the anthroposphere, in the long term the output must be of equal size than the input. This may not be noticed in a growing society, where a large fraction of the input is added to the stock, and hence the output is comparatively small. For instance: In many European countries, the output of construction wastes equals only 10-30% of the material input into the construction sector because of the still growing residential and industrial stock. This ratio is even more dramatic in emerging countries such as China and India, which are in the process of building their infrastructure, thus consuming huge amounts of materials without yet producing end-of-life wastes. In the future, it is inevitable that the large input will result in large amounts of emissions and wastes. Based on consumption figures of goods and their re-

Ilflussi di materia che attraversano le società del benessere sono considerevoli: ogni cittadino di un moderno complesso urbano utilizza ogni anno circa duecento tonnellate di materia, che includono acqua, aria, combustibili, materiali da costruzione, veicoli e beni di consumo [1]. Per la legge di conservazione della materia ogni materiale che entra nella cosiddetta “antroposfera” o viene stoccato, cioè trattenuto all'interno di essa, o ne esce sotto forma di emissioni o di altri prodotti: in altri termini nulla può “sparire”. Poiché i prodotti hanno tempi di permanenza nell'antroposfera limitati, a lungo termine ciò che esce deve essere uguale a ciò che entra. Ciò non è evidente in una società in via di sviluppo, nella quale una larga parte di ciò che entra viene aggiunta a ciò che è stoccato, e di conseguenza il materiale che esce è relativamente poco. Per esempio, in molti Paesi europei la produzione dei rifiuti dell'attività edilizia rappresenta solo il 10-30% del materiale in ingresso nel settore edile perché gran parte di esso è immagazzinato dall'attività residenziale ed industriale ancora in crescita. Questo dato è ancora più evidente nei paesi emergenti, come la Cina e l'India, che utilizzano enormi quantità di materiale per la costruzione delle proprie infrastrutture, producendo un'irrisoria quantità di rifiuti, derivanti per lo più dallo smantellamento di vecchie strutture.

sidence times, it can be predicted that – despite present efforts for waste prevention – future waste generation will be larger than today. In addition to increasing mass flows, the composition of the goods and corresponding wastes are changing, too. Modern multi-functional consumer and investment goods are complex mixtures of many compounds. They comprise valuable as well as hazardous substances in various amounts and combinations. In general, the mass flows of organic substances and of rare earth elements are increasing. Polymers are used increasingly in construction, a high volume sector. Many metal applications are replaced today by the use of organic substances. In advanced economies, plastic consumption is already larger than 150 kg per capita and year, and the plastic stock in use amounts to about 1 ton per capita. Both, flows and stocks of synthetic polymers are increasing fast [2].

In view of the large and increasing mass flows of wastes and changing waste composition, effective measures to protect the environment and to manage wastes are of prime importance. Sustainable waste management has three goals: To protect men and the environment, to conserve resources, and to ensure that waste management is “after-care-free”. The latter means that today’s waste problems may not be transferred into the future but that they must be solved by the generation that produced the wastes. In practice, this requires after care free landfills, and recycling schemes that do not cycle hazardous substances. A “clean cycle” strategy involves the separation of valuable and hazardous substances, and the disposal of the hazardous substances in appropriate “final sinks”, a place on the planet where substances have a very long residence time (> 10.000 years), and where they do not exert a negative impact on the environment [3].

In futuro è inevitabile che ad elevati consumi di materiale corrisponderanno elevati quantitativi di rifiuti. I dati relativi al consumo attuale di beni porta a dedurre che, nonostante gli sforzi sulla prevenzione, la produzione dei rifiuti sarà in futuro maggiore di quella attuale. Oltre all'aumento dei flussi di materia, anche la composizione dei beni e dei rifiuti corrispondenti è in evoluzione. I moderni beni multi-funzionali sono combinazioni complesse di molti composti. Comprendono sia sostanze di pregio che sostanze pericolose, in rapporti e combinazioni variabili. In generale, aumentano i flussi di massa delle sostanze organiche e degli elementi delle terre rare. I polimeri trovano un impiego crescente nell'importante settore delle costruzioni. Molti metalli sono sostituiti dalle sostanze organiche. Nelle economie avanzate, il consumo annuale della plastica è già oltre i 150 kg annui pro-capite, e la quantità di plastica stoccata in uso ammonta a circa 1 tonnellata pro-capite. Sia il flusso che l'immagazzinamento dei polimeri sintetici stanno rapidamente aumentando [2]. A fronte di un'ampia e crescente produzione dei rifiuti e della continua variazione nella loro composizione sono indispensabili misure adeguate per la salvaguardia dell'ambiente. Una gestione sostenibile dei rifiuti deve avere tre obiettivi: proteggere l'uomo e l'ambiente, conservare le risorse e rispettare il principio dell'*after-care-free*. Quest'ultimo significa risolvere le problematiche inerenti ai rifiuti “qui ed ora” cioè senza rimandarle nel tempo e facendone carico alla stessa generazione che li ha prodotti. In pratica ciò richiede discariche che non creino problemi ambientali nel tempo e schemi di riciclo che non mettano in circolo sostanze pericolose. Una strategia di “ciclo pulito” implica la separazione delle sostanze di pregio da quelle pericolose e il conferimento di queste ultime in adeguati “siti finali” dove abbiano tempi di permanenza molto lunghi (>

What is now the role of waste management - and in particular - of incineration within this "anthropogenic metabolism"? Sustainable, goal oriented waste management should produce three types of materials only, namely, (1) clean materials suited for recycling, (2) immobile materials safe for landfilling with no long-term negative impact on the environment, and (3) emissions that are compatible with environmental standards. Neither a "zero emission" strategy nor a "waste hierarchy" approach is required for reaching the goals of waste management. The decision between prevention, recycling and disposal must be based on economic grounds as well as on a sufficient understanding of the properties of the metabolic system "anthroposphere". Which strategies, concepts, and measures allow reaching waste management goals at least costs? Available information yields the following answer: Recycling on one hand and final disposal on the other hand contribute the most to the goals of waste management. Recycling ensures (1) that the large amounts of tailings, wastes and emissions arising during primary production are kept at a minimum, (2) that primary resources are conserved, and (3) that the amount of wastes which have to be disposed of are minimized. Thus, first priority is given to recycling, comprising of logistic systems to concentrate wastes, and of physical, chemical, and biochemical treatment to transform wastes into useful secondary resources.

However, since wastes contain not only valuable substances that can be recovered, means have to be provided to manage useless and hazardous materials, too. Incineration – the thermal transformation of materials at $T = 800-1000^{\circ}\text{C}$ oxidizing organic contents of wastes into inorganic components such as carbon dioxide and water – is a process that has been widely applied

10.000 anni) senza influire negativamente sull'ambiente [3].

Qual è il ruolo della gestione dei rifiuti, e in particolare della termovalorizzazione, in questo "metabolismo antropogenico"? Una gestione dei rifiuti sostenibile e ben finalizzata dovrebbe produrre solo tre tipi di rifiuti: (1) materiali puliti adatti ad essere riciclati, (2) materiali a bassa "veicolabilità ambientale" che possono essere conservati in sicurezza in discarica, senza timori di impatto a lungo termine sull'ambiente e (3) emissioni compatibili con gli standard ambientali. Né la strategia "zero emissioni" né l'approccio della "gerarchia dei rifiuti" sono richiesti per raggiungere gli obiettivi di una gestione dei rifiuti efficiente. La scelta tra prevenzione, riciclo e smaltimento definitivo deve essere basata su valutazioni economiche e su una sufficiente comprensione delle proprietà del sistema metabolico "antroposfera". Quali strategie, concetti e misure permettono di raggiungere gli obiettivi della gestione dei rifiuti con i costi minori? Le informazioni disponibili forniscono la seguente risposta: il riciclo da una parte e lo smaltimento finale dall'altra danno il maggiore contributo agli obiettivi di una gestione dei rifiuti sostenibile. Il riciclo assicura che (1) le grandi quantità di scarti, rifiuti ed emissioni che derivano dalla produzione primaria siano minimizzati, (2) le risorse primarie siano conservate e (3) la quantità di rifiuti che deve essere conferita in discarica sia ridotta al minimo. Quindi la priorità deve essere data al riciclo, comprendendo in esso i sistemi logistici per concentrare i rifiuti e i trattamenti fisici, chimici e biochimici per trasformare i rifiuti in utili risorse secondarie.

In ogni caso, poiché i rifiuti non contengono solo sostanze pregiate che possono essere recuperate, bisogna anche disporre di mezzi per gestire materiali senza valore e/o pericolosi. L'incenerimento, cioè la trasformazione termica del materiale a temperature di $800-1000^{\circ}\text{C}$, che ossida il contenuto organico dei rifiuti in compo-

in waste management in Europe, Japan and elsewhere. On a global scale, only a small portion of all municipal solid waste is treated by incineration, and landfilling is still the main process for > 80% of the global population. Incineration was first applied in large cities in the second half of the nineteenth century [4]. The main aim was to destroy organic constituents by fire for hygienic reasons, and to reduce the demand for landfill volume in densely populated urban areas. At the beginning of the 21st century, many countries (e.g. Japan, Switzerland, Germany, the Netherlands, and Scandinavian countries) use incineration as their main treatment process for MSW.

In the past, waste incineration has experienced many failures and successes. Today, state of the art municipal solid waste incinerators (MSWI) are excellent and environmentally safe means to dispose of wastes. This is due to (a) the long development history of > 100 years, (b) the strong opposition of the public resulting in pressure on legislators, designers and operators of incinerators, (c) a strict and progressive legislation regarding air pollution, and (d) the scientific and technological progress towards sophisticated furnace and gas cleaning technologies. Typical modern MSWI plants are running at a capacity of up to 20 Mg per hour per furnace, and usually serve a population of several hundred thousand inhabitants to dispose of their solid waste. Since the oxidation of MSW is, in all cases, an exothermal process, energy is released during incineration, which is used for district heating, for the generation of electricity, or for other purposes. In the beginning of waste incineration, a plant consisted mainly of a furnace and a stack. Today, the main part of a modern incinerator is the air pollution control (APC) system, consisting of:

nenti inorganiche, quali anidride carbonica e acqua, è un processo che è stato largamente applicato nella gestione dei rifiuti in Europa, Giappone e altrove. Su scala globale, solo una piccola frazione di tutti i rifiuti solidi urbani è però trattata con l'incenerimento. Il conferimento in discarica è ancora il processo principale per più dell'80% della popolazione del nostro pianeta. L'incenerimento è stato applicato per la prima volta in alcune grandi città nella seconda metà del diciannovesimo secolo [4]. Lo scopo principale era quello di distruggere la componente organica del rifiuto con il fuoco per ragioni igieniche e di ridurre i volumi destinati a discarica in aree urbane densamente popolate. All'inizio del 21° secolo molti paesi (quali Giappone, Svizzera, Germania, Olanda e Paesi Scandinavi) utilizzano la termovalorizzazione come principale trattamento per la gestione dei propri rifiuti solidi. In passato, l'incenerimento di rifiuti ha attraversato alti e bassi. Oggi, i moderni termovalorizzatori per Rifiuti Solidi Urbani (RSU) costituiscono un mezzo eccellente ed ambientalmente sicuro di trattamento dei rifiuti. Ciò è dovuto (a) alla loro lunga storia iniziata da più di un secolo, (b) alla forte opposizione del pubblico che ha incentivato legislatori, progettisti e operatori, (c) ad una severa legislazione sull'inquinamento atmosferico in continua evoluzione, e (d) al progresso scientifico e tecnologico che ha visto lo sviluppo di tecnologie sempre più sofisticate per la pulizia dei gas. Un tipico impianto moderno di termovalorizzazione dei rifiuti urbani funziona ad una capacità fino a 20 Mg per ora per linea, servendo centinaia di migliaia di abitanti a disfarsi dei propri rifiuti solidi. Poiché l'ossidazione dei rifiuti urbani è sempre un processo esotermico, durante l'incenerimento è emessa energia che viene usata per il riscaldamento di abitazioni, per la generazione di elettricità o per altri scopi. La prima generazione di impianti di incenerimento di rifiuti era composta

1. *gas cooling;*
2. *particle removal by bag filter or electrostatic precipitator;*
3. *acid scrubbing by wet scrubbers or injection of alkaline agents;*
4. *catalytic or other reduction of nitrous oxides*
5. *possibly activated carbon for removal of persistent organic pollutants and dioxins;*
6. *release of purified gas to atmosphere through the stack.*

On a mass flow base, almost 80% of the incoming waste leaves the incinerator by purified off-gas, 20% remains in the bottom ash, and 2-4% consists of residues from air pollution control (APC). This mass flow partition illustrates an important advantage of incineration: it reduces the quantity of waste to be landfilled or to be handled further by a factor of 5. On a volume base this is even more impressive and amounts to a ratio of 10 (waste) to 1 (bottom ash plus APC residue). On the level of chemical elements, partitioning depends on their physical and chemical properties, on the speciation of substances in the waste, and on design and operation parameters of the furnace. Most non-metals are transferred to the off-gas, while metals – with the exception of atmophilic metals such as mercury and cadmium - tend to be retained in the bottom ash [5].

Carbon, that is mainly present in MSW as organic carbon, is transferred almost completely (99%) to the exhaust gas as carbon dioxide; around 1% remains in bottom ash and APC residue. 90% of Phosphorus, a lithophilic element, is transferred to the bottom ash. Chlorine shows atmophilic behavior and is moved to the raw gas as hydrogen chloride. In the acid step of the wet scrubbing process, chloride is transferred to the waste water, and finally released to the receiving waters. Sulfur, partly oxidi-

essenzialmente da un forno e da un camino. Oggi invece, la parte principale degli impianti di nuova generazione è costituita dal sistema di controllo dell'inquinamento atmosferico (APC) formato da:

1. raffreddamento del gas;
2. rimozione delle polveri attraverso un filtro a manica o un precipitatore elettrostatico;
3. lavaggio dei gas acidi attraverso sistemi ad umido o sistemi a secco con iniezione di agenti alcalini;
4. riduzione catalitica o non degli ossidi di azoto;
5. rimozione di contaminanti organici persistenti e di diossine con carboni attivi;
6. rilascio in atmosfera dei gas purificati attraverso il camino.

Su base massica, circa l'80% dei rifiuti immessi lascia l'inceneritore sotto forma di emissione gassosa, il 20% è rilasciato sotto forma di ceneri di fondo e circa il 2-4% come residui del sistema di pulizia dei gas (APC). Questa ripartizione del flusso di massa indica un importante vantaggio dell'incenerimento: esso riduce di un fattore 5 la quantità di rifiuti da conferire in discarica o da trattare ulteriormente. Su base volumetrica la riduzione è ancora più significativa: il rapporto in questo caso è da 10 (rifiuti) a 1 (ceneri di fondo più residuo APC). A livello dei singoli elementi chimici la ripartizione dipende dalle loro proprietà fisiche e chimiche, dalle sostanze specifiche nelle quali essi sono presenti nei rifiuti oltre che dai parametri di progetto e operativi del forno. La maggior parte degli elementi non metallici viene trasferita nella fase gas, mentre i metalli, ad eccezione di quelli atmofili come il mercurio e il cadmio, tendono ad essere trattenuti nelle ceneri di fondo [5].

Il carbonio, che è principalmente presente nei rifiuti solidi urbani come carbonio organico, è trasferito quasi completamente (99%) ai gas effluenti sotto

zed to volatile oxides (mainly SO_3) is separated by neutralizing the aqueous sulfuric acid. However, a significant portion (15%) leaves by the off-gas. About 25% of the sulfur is transferred to the bottom ash as sulfate salt. Among the metallic elements, calcium is primarily transferred to the bottom ash where it is present as calcium oxide and in a variety of calcium silicates. Calcium belongs - together with iron, silicon, aluminum, iron, and oxygen - to the main constituents of the bottom ash. Among the minor metallic elements, close to 50% of zinc is transferred to the APC residue, which exhibits a similar zinc concentration as zinc ore (2%). Cadmium is even more atmophilic and is found mainly in gas cleaning residues (filter ash). Lead is similar to zinc and is transferred mainly to the bottom ash (60%). The bulk of copper is found in the bottom ash. Bottom ash contains considerable amounts of metals such as iron and copper. At present, only little metals are recovered from bottom ash, and the bulk is deposited in landfills. In a few countries, bottom ash is used as a gravel substitute for road construction [6]. This practice is questionable on the grounds of environmental protection since bottom ashes are emitting polluted leachates. In future, more metals will be recovered from bottom ash because this appears economically attractive (see below). In addition, efforts are being undertaken to improve the quality of the remaining bottom ash. The goal is, to recycle both the metals as well as the remaining minerals, e.g. as a substitute for aggregates.

Due to the partitioning described above, APC residues contain large amounts of volatile heavy metals such as cadmium, antimony, lead, zinc, and mercury. Thus, they are considered as hazardous wastes and have to be deposited in specially equipped final sinks such as underground storages (e.g. former

forma di anidride carbonica. Circa l'1% rimane nelle ceneri di fondo e nel residuo dell'APC. Il 90% del fosforo, un elemento litofilo, è trasferito nelle ceneri di fondo. Il cloro mostra un comportamento atmofilo ed è trasferito nella fase gassosa sotto forma di acido cloridrico. Nella fase di lavaggio nei sistemi ad umido il cloro è trasferito nelle acque di scarico ed infine rilasciato nei corsi d'acqua. Lo zolfo è parzialmente ossidato in ossidi volatili (principalmente SO_3) e separato neutralizzando l'acido solforico in soluzione acquosa. Comunque una frazione significativa di esso (15%) viene emessa nella fase gassosa. Circa il 25% dello zolfo è trasferito alle ceneri di fondo come sale solfato. Tra gli elementi metallici, il calcio è principalmente trasferito alle ceneri di fondo dove è presente sia sotto forma di ossido che sotto forma di diversi silicati. Il calcio è, insieme a ferro, silicio, alluminio e ossigeno, uno dei principali costituenti delle ceneri di fondo.

Tra gli elementi metallici minori, circa il 50% dello zinco si trova nei residui del sistema APC, nei quali raggiunge concentrazioni simili a quelle di un minerale di zinco (2%). Il cadmio è ancora più atmofilo e lo si trova principalmente nelle ceneri dei filtri di pulizia del gas. Il piombo ha un comportamento simile allo zinco e viene trasferito essenzialmente nelle ceneri di fondo (60%). Anche gran parte del rame e del ferro si trova nella ceneri di fondo, le quali contengono quindi considerevoli quantità di metalli. Attualmente solo una piccola parte dei metalli sono estratti dalle ceneri di fondo; gran parte di essi finisce in discarica insieme alle ceneri. In qualche Paese le ceneri di fondo sono utilizzate al posto della ghiaia nella costruzione delle strade [6]. Tale pratica è discutibile sulla base del principio della protezione ambientale perché le ceneri di fondo rilasciano percolato. In futuro è prevedibile che diventerà economicamente vantaggioso estrarre i metalli dalle ceneri (vedi più avanti). Si sta anche cer-

salt mines). An alternative is to recycle the metals contained in the ash. Since MSW contains nearly half of all Cd used in society, and since close to 90% of Cd contained in MSW is transferred to filter ash, the recovery of this metal from filter ash could supply a large fraction of Cd used in the anthroposphere. Such schemes are possible for other metals, too (Pb, Zn, Sb, Sn, etc.). In order to make the recycling of filter residues economically feasible, it may be necessary to concentrate and accumulate these materials in a few storage places for long time periods. After decades to centuries, this will result in large amounts of secondary resources that can be recovered at competitive economic and environmental costs [7].

In the following, it is discussed why MSW incineration is a key element of waste management and of anthropogenic metabolism: As discussed above, the mass flow of wastes as well as the amount of hazardous substances in the wastes are large and – due to the growing stock that will become wastes in the future - still increasing. The main function of waste incineration is to act as a sink for hazardous materials, in particular for persistent organic pollutants, but also for inorganic substances. Waste management has no other means to safely dispose of hazardous organic compounds contained in MSW. Neither mechanical biological treatment nor aerobic (composting) or anaerobic (digestion, landfilling) treatments are able to completely mineralize refractory organic carbon compounds. Since many thousands of tons of such chemicals are used in consumer products, it is necessary to have reliable, proven technologies at hand that are able to completely mineralize hazardous organic substances. Incineration by grate furnaces, fluidized bed incinerators, and rotary kilns is the most important and necessary measure to destroy such

cando di migliorare la qualità delle ceneri rimanenti. L'obiettivo è riciclare sia i metalli che i minerali residui, per esempio come componenti per l'edilizia.

Per la ripartizione degli elementi sopra descritta i residui dell'APC contengono grandi quantità di metalli pesanti volatili, quali cadmio, antimonio, piombo, zinco e mercurio. Ne deriva che essi sono considerati rifiuti pericolosi e devono essere depositati in siti di smaltimento finale dotati di protezioni speciali, quali depositi sotterranei (ad es., vecchie miniere di salgemma). Un'alternativa è quella di riciclare i metalli contenuti nelle ceneri. Poiché i rifiuti solidi urbani contengono circa la metà di tutto il cadmio usato dalla nostra società, e poiché circa il 90% del cadmio contenuto nei rifiuti solidi urbani è trasferito alle ceneri dei filtri, il recupero di questo metallo fornirebbe una grande percentuale del cadmio usato nell'antroposfera. Questi schemi sono applicabili anche ad altri metalli (piombo, zinco, antimonio, stagno, ecc.). Per rendere economicamente conveniente il riciclo dei residui del processo di filtrazione, può essere necessario concentrare e accumulare questi materiali in zone specifiche per lunghi periodi. Dopo decenni o secoli, grandi quantità di risorse secondarie potranno essere recuperate con costi economici ed ambientali competitivi [7].

Si discuterà adesso perché l'incenerimento dei rifiuti solidi urbani è un elemento chiave nella gestione dei rifiuti e nel metabolismo antropogenico. Come si è appena argomentato, il flusso di rifiuti così come quello delle sostanze pericolose in essi presenti sono rilevanti e, a causa del crescente accumulo di materiale che diventerà rifiuto in futuro, cresceranno ancora. La funzione principale dell'incenerimento dei rifiuti è di agire come un immagazzinatore di materiali pericolosi, in particolare per gli inquinanti organici persistenti (POPs), ma anche per le sostanze inorganiche. Si intende dire che la gestione dei rifiuti non ha altri

substances. Other thermal processes running on oxygen deficiency such as gasification and pyrolysis may catch up with incineration in the future [8]. However, first they have to prove that their conversion effectiveness for hazardous organics is as high as by thermal processes, which effectively mineralize organics to carbon dioxide, water and other non-organic products.

Examples of persistent organic pollutants contained in large amounts in wastes are chlorofluorocarbons (CFC) that are detrimental for the stratospheric ozone layer, brominated flame retardants such as polybrominated diphenylethers (PBDE), and phthalates such as Diethylhexylphthalate (DEHP), both having estrogenic and toxic properties for humans. These chemicals are often used as additives in consumer goods and plastic products, and subsequently turn up in waste management. Since they constitute a small fraction of a product only, it is neither feasible nor economical to recycle such substances. Hence, they must be carefully collected and completely mineralized by thermal processes.

Besides the key function of incineration as the only safe sink for hazardous carbon compounds contained in MSW, thermal waste processing allows reducing the emission of greenhouse gases from waste management, too. When MSW is landfilled, degradable organic carbon is transformed into methane and carbon dioxide. It is not possible to collect and utilize all the landfill gas produced because a landfill is not a completely controlled reactor. It has to be kept in mind that the residence time of a landfill is "forever", and that all technical barriers known today have a limited life time. Thus, in the long run (> 100 years), when the landfill envelope loses its function, greenhouse gas will leave the landfill body uncontrolled. In addition, in the short term, local

mezzi per lo smaltimento in sicurezza dei composti organici pericolosi presenti nei rifiuti solidi urbani. Né il trattamento meccanico biologico, né quello aerobico (compostaggio) o anaerobico (digestione anaerobica o messa in discarica) sono in grado di mineralizzare completamente i composti refrattari del carbonio organico. Poiché molte migliaia di tonnellate di tali elementi chimici vengono utilizzati nei prodotti di consumo, è necessario disporre di tecnologie affidabili e collaudate che siano in grado di mineralizzare completamente le sostanze organiche pericolose. L'incenerimento mediante forni a griglia, forni a letto fluido e forni rotanti, è il metodo più importante oltre che necessario, per distruggere tali sostanze. Altri processi termici che sono condotti in difetto di ossigeno, come la gassificazione e la pirolisi, possono essere delle valide alternative all'incenerimento [8]. Tuttavia esse devono innanzitutto dimostrare di garantire elevata efficienza nella conversione delle sostanze organiche pericolose, perlomeno pari a quella della termovalorizzazione tradizionale che è in grado di mineralizzare sostanze organiche in anidride carbonica, acqua e altri prodotti inorganici.

Esempi di inquinanti organici persistenti contenuti in grandi quantità nei rifiuti sono clorofluorocarburi (CFC) che sono dannosi per lo strato di ozono stratosferico, ritardanti di fiamma bromurati quali difenileteri polibromurati (PBDE), ftalati come dietililftalato (DEHP), contenenti estrogeni e proprietà tossiche per l'uomo. Queste sostanze chimiche sono spesso utilizzate come additivi nei beni di consumo e prodotti plastici, e successivamente avviate al sistema gestione dei rifiuti. Poiché esse costituiscono solo una piccola frazione del prodotto, il riciclo di tali sostanze non è né tecnicamente fattibile né economico: esse devono essere accuratamente recuperate e completamente mineralizzate a valle dei trattamenti termici.

landfill gas ex-filtrations are likely and are observed on most landfills; they also contribute to climate change. When organic wastes are composted, carbon is emitted as carbon dioxide without utilizing the energy that is set free by the oxidation of the degradable carbon compounds. Waste incineration prevents the leaks and emissions of methane and carbon dioxide of landfilling and composting.

In addition, waste incineration allows utilization of waste derived energy. Heat and power generated by thermal waste to energy plants allow replacing fossil fuel energy production. It is worth to note that about 50% of carbon contained in MSW is of biogenic origin. Thus, greenhouse gases that are produced today by utilizing fossil fuels can be avoided if in future incineration with energy recovery is applied for waste management. While on a national scale and due to the low carbon flow in MSW, only a few percent (< 5%) of the total energy demand can be satisfied by waste to energy plants, this may be more on a regional (urban) scale when wastes from a large population are concentrated in one location.

A third advantage of incineration is the potential to recycle materials. As shown earlier, during incineration metals are partitioned in a specific way. This allows concentrating and recovering individual metals in defined incineration products, such as filter ash (see above). Recent progress in analysis has shown that there is a large potential to recover valuable metals from bottom ash, too [9]. The mass flows of aluminum, copper and other metals in bottom ash are in an order of magnitude that appears attractive to investigate recovery. First attempts to separate valuable metals from bottom ash with new, sophisticated methods are promising [10]. A prerequisite is to recover bottom ash as a dry product. Today's incinerators are

Al di là del ruolo chiave dell'incenerimento come unica via sicura di immagazzinamento di composti carboniosi pericolosi contenuti nei rifiuti urbani, i trattamenti termici consentono anche di ridurre le emissioni di gas a effetto serra dalla gestione dei rifiuti. Quando i rifiuti solidi urbani sono conferiti in discarica, il carbonio organico degradabile è trasformato in metano ed anidride carbonica. Non è possibile raccogliere ed utilizzare tutti i gas prodotti in discarica perché una discarica non è un reattore completamente controllato. Va tenuto presente che la vita di una discarica è "per sempre" e che qualsiasi barriera tecnica oggi ha un tempo di vita limitato. Così alla lunga (più di 100 anni), quando l'involucro della discarica perderà la sua funzione, il gas serra fuoriuscirà dal corpo della discarica in maniera incontrollata. In aggiunta, anche a breve termine si possono verificare rilasci locali di gas, come si è osservato nella maggior parte delle discariche: anche tali rilasci contribuiscono ai cambiamenti climatici. Quando i rifiuti organici vengono compostati, il carbonio è emesso come anidride carbonica senza utilizzare l'energia che viene liberata dall'ossidazione dei composti di carbonio degradabili. L'incenerimento dei rifiuti previene le perdite e le emissioni di metano e anidride carbonica delle discariche e del compostaggio.

Inoltre, l'incenerimento di rifiuti permette l'utilizzo dell'energia derivante dai rifiuti. Il calore e l'elettricità, generati dagli impianti che producono energia dal trattamento termico dei rifiuti, permettono la sostituzione della produzione di energia dai combustibili fossili. È importante notare che circa il 50% del carbonio contenuto nei rifiuti urbani è di origine biogenica. Quindi, i gas a effetto serra che sono prodotti oggi dall'utilizzo di combustibili fossili potrebbero essere evitati se in futuro la termovalorizzazione dei rifiuti venisse maggiormente utilizzata nella gestione dei rifiuti. Mentre

usually equipped with wet bottom ash collectors, the water bath operating as a lock against air entering the furnace. Future incinerators have to be redesigned for dry bottom ash removal, which is feasible and has the positive side effect of slightly increased energy efficiency. The dry bottom ash is crushed and sieved, and individual metals are recovered by electromagnetic, eddy current, and additional, innovative methods. In future, it may even become feasible to separate rare earth metals from bottom ash. It is anticipated that the additional cost of metal extraction is paid by the revenue for secondary metals. In fact, some of the protagonists of the dry collection and separation method claim that the large scale recovery of metals from incineration products will decrease the costs of MSW incineration considerably, making this technology cost effective when compared to landfilling.

In any case, the recovery of metals from MSW incineration inspires new strategies for waste management: if it becomes possible to recycle metals from incineration residues, the need for many separate collection systems for individual waste streams is not justifiable anymore. This is of particular interest because waste collection systems are expensive, and account for about half of the waste management costs. Thus, if separate waste collection schemes become obsolete, financial resources can be saved and used for other measures. A future optimized waste management concept may well be based on the separate collection of those waste constituents that can be recycled economically (e.g. paper, glass, PET-bottles). The rest, including waste electric and electronic equipment (WEEE), end of life vehicles (ELV), organic fractions of construction waste separation and others, can be successfully treated in MSW incinerators furnished with dry

su scala nazionale, per il basso flusso di carbonio nel rifiuto urbano, solo una piccola percentuale (< 5%) della domanda totale di energia può essere soddisfatta dagli impianti di termovalorizzazione, su scala regionale (urbana) tale richiesta potrebbe essere soddisfatta per un livello maggiore poiché i rifiuti prodotti da una popolazione numerosa sarebbero concentrati in un unico sito.

Un terzo vantaggio dell'incenerimento dei rifiuti è la potenzialità di riciclo di materiali. Come illustrato in precedenza, durante l'incenerimento i metalli sono ripartiti in modo specifico. Questo permette la concentrazione e il recupero di singoli metalli in prodotti di incenerimento definiti, come ad esempio, le ceneri di filtrazione (vedi sopra). I recenti progressi nelle analisi hanno anche dimostrato che esiste un grande potenziale per il recupero di metalli di valore dalle ceneri di fondo [9]. I flussi di massa di alluminio, rame e altri metalli nelle ceneri di fondo sono di un ordine di grandezza tale che risulta interessante studiarne il recupero. I primi tentativi per separare i metalli preziosi dalle ceneri di fondo con metodi nuovi e sofisticati sono promettenti [10]. Un prerequisito è quello di recuperare le ceneri di fondo come un prodotto secco. Gli inceneritori moderni sono equipaggiati con raccoglitori di ceneri di fondo umide, dove il bagno di acqua funziona come una guardia idraulica a protezione dell'ingresso dell'aria nel forno. I futuri inceneritori devono essere progettati per la rimozione a secco delle ceneri di fondo, e ciò è fattibile, come dimostrano esperienze recenti, ed ha il positivo effetto collaterale di un'efficienza energetica leggermente maggiore. La cenere di fondo secca vengono macinate e setacciate, ed i singoli metalli sono recuperati con metodi elettromagnetici, a correnti parassite, ed altri innovativi. In futuro potrebbe anche diventare possibile separare i metalli classificati come terre rare dalle ceneri di fondo. Si prevede che il costo aggiuntivo

bottom ash removal and high-tech recovery of valuable metals. Such a goal oriented waste management concept is likely to be cheaper, more environmentally friendly, and to conserve more resources than the traditional waste management schemes of today.

References

1. Baccini, P. and Brunner, P.H. (2012) *Metabolism of the Anthroposphere – Analysis, Evaluation, Design*, 2nd edition, MIT Press, Cambridge.
2. Plastics Europe (2011) *Plastics - the Facts 2011, An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010*, Association of Plastics Manufacturers, Brussels.
3. Döberl, G. and Brunner, P. H. (2004) *Substances and their (final) Sinks - a New Indicator for Monitoring Sustainability, Symposium „Indicators for Evaluating Sustainable Development - The Ecological Dimension“*, 1.-2. November 2004, Berlin.
4. de Fodor, E. (1911) *Elektrizität aus Kehrlicht*, MABEG Gesellschaft für Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik mbH & Co., Herne.
5. Morf, L.S. and Brunner, P.H. (1998) "The MSW Incinerator as a Monitoring Tool for Waste Management", *Environmental Science and Technology*, Vol. 32, No. 12, p. 1825-1831.
6. Lam, C.H.K, Ip, A.W.M., Barford, J.P., and McKay, G. (2010) Use of Incineration MSW Ash: A Review, *Sustainability*, 2, 1943-1968.
7. Brunner, P. H., Morf, L.S., and Rechberger, H. (2004) Thermal waste treatment - A necessary element for sustainable waste management, In: *Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation*, Twardowska, I., Allen, H.E., Kettrup, A.A.F., Lacy, W.J. (Eds.), Elsevier Ltd., Kidlington, Oxford, p. 783-806.
8. Arena U. (2012) Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Management*, 32:625-639.
9. Skutan, S., and Brunner, P.H. (2012) Metals in RDF and other high calorific value fractions from mechanical treatment of municipal solid waste - analysis and sampling errors, *Waste Management and Research*, manuscript accepted for publication.
10. Morf, L., Kuhn, E., Adam, F. and Böni, D. (2009): Optimized metal recovery from waste incineration bottom ash with dry extraction system – successful full size plant experience. In: *R'09 Twin World Congress*, Davos, 14.-16. Sept 2009. Eds. EMPA, Dübendorf, Switzerland.

dell'estrazione dei metalli sia sostenuto grazie ai ricavi dei metalli secondari. In effetti, alcuni dei fautori della raccolta a secco e dei metodi di separazione affermano che il recupero di metalli in larga scala dai prodotti di incenerimento ridurrà in modo considerevole i costi della termovalorizzazione degli RSU, rendendo questa tecnologia più economica rispetto al conferimento in discarica.

In ogni caso, il recupero di metalli dall'incenerimento di RSU suggerisce nuove strategie per la gestione dei rifiuti. Se diventasse possibile riciclare i metalli dai residui di incenerimento, la necessità di molti sistemi di raccolta differenziata per i singoli flussi di rifiuti non sarebbe più giustificabile. Questo è di particolare interesse perché i sistemi di raccolta dei rifiuti sono costosi, richiedendo circa la metà dei costi di gestione complessivi. Così, se gli schemi per la raccolta differenziata diventassero obsoleti, le risorse finanziarie potrebbero essere conservate e utilizzate per altre tecniche. Un futuro ed ottimizzato concetto di gestione dei rifiuti potrebbe essere basato sulla raccolta differenziata di quelle sostanze di scarto che possono essere riciclate economicamente (es. carta, vetro, bottiglie di plastica in PET). Il resto, compresi i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), quelli della rottamazione dei veicoli (ELV), le frazioni organiche da costruzione e demolizione ed altri, possono essere trattati con successo in inceneritori di RSU dotati di sistemi di rimozione a secco delle ceneri di fondo e di recupero di metalli di valore con tecnologie avanzate. Un tale concetto di gestione dei rifiuti orientata ad un obiettivo (*goal oriented management*) è probabile che sia più economico, più rispettoso dell'ambiente, ed in grado di conservare più risorse rispetto agli schemi tradizionali di gestione dei rifiuti attualmente utilizzati.