



ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI E FONDAZIONE «GUIDO DONEGANI»

---

CONVEGNI LINCEI SU "IL FUTURO DELL'UMANITÀ"

## MATERIE PRIME CRITICHE PER L'ENERGIA

22-23 MAGGIO 2025

### ABSTRACT

*Comitato ordinatore:* Lidia ARMELAO (Direttrice del Dipartimento di Chimica e Tecnologia dei Materiali CNR), Silvia BORDIGA (Lincea, Università di Torino), Andrea CANESCHI (Direttore INSTM), Bruno CARLI (Linceo, IFAC-C.N.R.), Modestino COLARUSSO (Direttore Generale, Confindustria Energia), Gianluca FARINOLA (Presidente SCI), Gaetano GUERRA (Coordinatore, Linceo, Università di Salerno), Annibale MOTTANA (Linceo, Università Roma Tre), Gianfranco PACCHIONI (Linceo, Università di Milano-Bicocca), Giuseppe RICCI (Presidente AIDIC), Roberto ZOBOLI (Linceo, Università Cattolica del Sacro Cuore)

### PROGRAMMA

La decrescente disponibilità di alcune materie prime necessarie per nuove tecnologie desta preoccupazioni condivise da comunità scientifiche ed economiche di tutto il mondo. Ci sono rilevanti aspetti chimici nella estrazione, nella purificazione e nel riciclo di molte materie prime critiche. L'argomento è certamente rilevante anche per i mineralogisti e più in generale per i geologi e coinvolge importanti aspetti economici. Tra gli obiettivi del Convegno c'è anche la preparazione di un "position paper" dell'Accademia su tale importante tematica.

#### Giovedì 22 maggio

##### 14.30 Indirizzi di saluto

Roberto ANTONELLI (Presidente dell'Accademia Nazionale dei Lincei)

Carlo DOGLIONI (Presidente della Classe di Scienze Fisiche e Naturali)

#### Chair: Silvia BORDIGA (Lincea, Università di Torino)

14.50 Tutorial 1: Andrea DINI (CNR-Istituto di Geoscienze e Georisorse): *Materie prime critiche e transizione energetica: istruzioni per l'uso*

15.10 Tutorial 2: Silvia GROSS (Università di Padova): *Approcci sostenibili al recupero ed alla separazione di CRM da scarti industriali: il ruolo della chimica inorganica e di coordinazione*

#### Chair: Annibale MOTTANA (Linceo, Università Roma Tre)

15.30 Tutorial 3: Giuseppe BELLUSSI (AIDIC): *Materiali critici per l'energia: transizione energetica e oltre*

15.50 Tutorial 4: Roberto ZOBOLI (Linceo, Università Cattolica del S. Cuore): *Aspetti geopolitici ed economici dei materiali critici per l'energia*

#### Chair: Gianluca FARINOLA (SCI, Università di Bari)

16.10 Diego GATTA (Università di Milano): *Georisorse minerarie italiane: passato, presente e futuro*

16.30 Intervallo

16.50 Gian Andrea BLENGINI (Università di Torino): *Perché le materie prime diventano critiche: esaurimento, insostenibilità o criticità?*

17.10 Presentazioni poster

**Coordinatori: Lidia ARMELAO (CNR)**

**Maria Franca BRIGATTI (Lincea, Università di Modena e Reggio Emilia)**

**Mario CHIESA (SCI, Università di Torino)**

**Anna Maria RASPOLLI GALLETTI (SCI, Università di Pisa)**

18.10 Visita ai Poster

**Venerdì 23 maggio**

**Chair: Andrea CANESCHI (INSTM, Università di Firenze)**

9.00 Angela SERPE (Università di Cagliari): *Urban mining e ruolo della chimica: il recupero dei metalli dai RAEE*

9.20 Elza BONTEMPI (Università di Brescia): *La transizione energetica e dei materiali*

9.40 Claudio SANGREGORIO (CNR, ICCOM): *Strategia e soluzioni per la sostituzione delle terre rare nei magneti permanenti*

**Chair: Giuseppe RICCI (AIDIC, ENI)**

10.00 Simona BARISON (CNR, ICMATE): *Materiali critici strategici nella economia dell'idrogeno: come possiamo ridurli?*

10.20 Antonino Salvatore ARICÒ (CNR, ITAE): *Nuovi materiali e tecnologie elettrolitiche da materie prime non critiche*

10.40 Intervallo

11.00 **Tavola rotonda: Materie prime critiche: priorità per l'Italia**

**Coordinatori: Modestino COLARUSSO (Confindustria Energia), Gianfranco PACCHIONI (Linceo, Università di Milano-Bicocca)**

Partecipano: Claudia BRUNORI (ENEA), Laura D'APRILE (MASE), Roberto FERRANTE (Cassa Depositi e Prestiti), Alfredo MANCINI (VP AIDIC e Orim), Simone MANFREDI (ISPRA), Tiziano MESTRINER (Assorisorse), Marco RAVAZZOLO (Confindustria).

12.30 *Conclusioni*

## **POSTERS**

1. Simone BERNARDINI (Università Roma Tre): *La conduttività elettrica degli anfiboli: una potenziale georisorsa*
2. Andrea RIELLI (CNR IGG Pisa): *Magnesite: una soluzione per CRM e CCS mineralogico*
3. Licia SANTORO (Università di Torino): *Materiali critici e strategici in Italia, potenzialità in alcuni distretti piemontesi*

4. Micol BUSSOLESI (Università di Milano Bicocca): *Strategie per mitigare la criticità dell'antimonio: casi di studio in Grecia e Italia*
5. Pietro Ostellari (Università di Padova): *Recupero sostenibile di rame (Cu) da scarti industriali*
6. Beatrice MUZZI (CNR-ICCOM Firenze): *Riciclo di magneti permanenti a terre rare*
7. Andrea CIPOLLINA (Università di Palermo): *SEArcularMINE. Un approccio circolare per il recupero di minerali e materie prime dalle salamoie marine*
8. Maria Vincenza PAGLIARO (CNR-ICCOM Firenze): *Economia circolare delle batterie al litio*
9. Emilia PAONE (Università di Reggio Calabria): *Valorizzazione di Batterie agli ioni di litio esauste per la preparazione di materiali per la catalisi*
10. Elisa MERCADELLI (ISSMC-CNR Faenza): *Batterie al sodio come alternativa all'impiego di litio*
11. Simone GALLIANO (Università di Torino): *Polimeri metalloorganici come candidati sostenibili nei generatori termoelettrici*
12. Stefano NEJROTTI (ISSMC-CNR Faenza): *Materiali biogenici sostenibili per l'illuminazione a stato solido*
13. Gaia CASTELLANI (Università di Trieste): *Sostituzione e/o minimizzazione di elementi critici in catalisi*
14. Micol DI VEROLI (Sapienza Università di Roma): *Impurità e loro impatto sui catodi NMC811 (Ni80Mn10Co10) riciclati*
15. Fausta GIACOBELLO (ITAE CNR Messina): *Nuovi elettro-catalizzatori senza CRM per applicazioni in elettrolisi a membrana*
16. Federico BELLA (Politecnico di Torino): *Produzione di ammoniaca e fertilizzanti mediante elementi e processi sostenibili*
17. Giovanni DI LIBERTO (Università Milano-Bicocca): *Catalizzatori ad atomo singolo: un approccio per il risparmio di materie prime critiche*
18. Pietro ALTIMARI (Sapienza Università di Roma): *Analisi tecno-economica di un processo di riciclo di pannelli fotovoltaici: impatto del recupero di silicio e argento*

Il convegno è organizzato in collaborazione con Società Chimica Italiana, Associazione Italiana di Ingegneria Chimica, Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali, Dipartimento di Scienze Chimiche e Tecnologie dei materiali del CNR e Confindustria Energia.

ROMA - PALAZZO CORSINI - VIA DELLA LUNGARA, 10  
Segreteria del convegno: convegni@lincei.it - <http://www.linsei.it>

Tutte le informazioni per partecipare al convegno sono disponibili su:  
<https://www.linsei.it/it/manifestazioni/materie-prime-critiche-lenergia>

All information for attending the conference is available at:  
<https://www.linsei.it/it/manifestazioni/materie-prime-critiche-lenergia>

Per partecipare al convegno è necessaria l'iscrizione online  
I lavori potranno essere seguiti dal pubblico anche in streaming

L'attestato di partecipazione al convegno viene rilasciato esclusivamente a seguito di partecipazione in presenza fisica e deve essere richiesto al personale preposto in anticamera nello stesso giorno di svolgimento del convegno

## **Materiali critici per l'energia: transizione energetica e oltre**

Giuseppe BELLUSSI (AIDIC)

Le fonti di energia più importanti per la sostituzione delle fonti fossili sono: solare fotovoltaico, eolico, nucleare e biomasse. Riguardo ai vettori energetici primari, eolico e solare producono energia elettrica, il nucleare energia elettrica e calore, mentre le biomasse producono vettori gassosi, liquidi e calore. Alcune di queste fonti e alcuni vettori richiedono intrinsecamente l'utilizzo di alcuni materiali e metalli che a causa della loro disponibilità, localizzazione geografica e mercato possono creare criticità soprattutto per i paesi europei.

In questa presentazione verranno analizzati i passaggi che coinvolgono l'utilizzo di materiali critici, cercando ove possibile di quantificare le necessità. Saranno analizzati i motivi alla base della criticità e verranno proposte alcune azioni di contrasto per limitare gli effetti negativi per l'Europa.

## **Perché le materie prime diventano critiche: esaurimento, in-sostenibilità o criticità?**

Gian Andrea BLENGINI (Università di Torino)

Perché le materie prime critiche sono diventate così centrali nel contesto del Green Deal europeo e più in generale per le transizioni energetica e digitale? Chi ne valuta la criticità nel contesto internazionale, come e per quali scopi? La discussione toccherà le possibili cause delle crisi di approvvigionamento di materiali critici, la capacità di valutarne le conseguenze alla luce delle metodologie e dei dati disponibili, nonché le possibili contromisure di mitigazione. Seguiranno domande, analisi e risposte sul ruolo di vari fattori e caratteristiche tecnico-economico-ambientali delle risorse minerarie quali, ad esempio, l'esauribilità o la circolarità, centrali nelle valutazioni di criticità e sostenibilità.

## **Urban mining e ruolo della chimica: il recupero dei metalli dai RAEE**

Angela SERPE (Università di Cagliari)

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) oggigiorno pervadono la gran parte degli ambienti domestici, lavorativi e industriali. Il loro uso è diventato indispensabile nella società moderna e contribuisce a migliorare gli standard di vita nel mondo globalizzato. A maggiore ricchezza e tasso di industrializzazione, tipicamente corrisponde un più alto consumo di AEE. A fine vita, tuttavia, le AEE ormai non più utilizzabili o obsolete vengono smaltite, generando quello che rappresenta uno dei maggiori flussi di rifiuti (RAEE) dei nostri giorni e che costituisce, se non opportunamente valorizzato, una fonte di inquinamento nonché un ingente spreco delle risorse preziose che contiene, tra cui metalli di valore che ne rappresentano circa il 50 % in peso. La produzione globale di RAEE, circa 62 milioni di tonnellate nel 2022, è cresciuta di circa 18 Mt dal 2014 e si prevede che crescerà fino a circa 75 Mt entro il 2030. Nel contesto della transizione energetica, l'approvvigionamento sicuro e sostenibile delle materie prime critiche (CRM) è una sfida strategica. L'*urban mining*, ovvero il recupero di risorse da dispositivi tecnologici a fine vita come i RAEE, offre un'alternativa concreta e circolare alla loro estrazione mineraria che comporta costi ambientali elevati e dipendenze geopolitiche. In questo scenario, si presenteranno approcci innovativi per il recupero di metalli critici dai RAEE tramite un uso "intelligente" della chimica di coordinazione, puntando alla massima selettività e minimo impatto ambientale, verso un modello circolare sostenibile e a "rifiuti zero". La

chimica viene qui messa al servizio dello sviluppo, tramite approccio multidisciplinare integrato, di tecnologie fini, efficienti e pulite di riciclo dei materiali, con trattamenti a bassa temperatura e con agenti liscivianti sicuri, riciclabili, in parte ottenuti valorizzando materie prime seconde agroindustriali, senza emissioni tossiche e con bassissimo tasso di residui da smaltire, anche grazie alla produzione di materie prime seconde di elevato valore commerciale e ambientale.

*Gli sviluppi più recenti di questo lavoro sono stati ottenuti nell'ambito del progetto "SMART PCBs - Sustainable Materials Recycling Technology for Printed Circuit Boards" co-finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), Bando RAEE 2020, CUP F57G20000050001.*

### **La transizione energetica e dei materiali**

Elza BONTEMPI (Università di Brescia)

La transizione ecologica non implica soltanto un cambiamento delle fonti di energia, ma anche una profonda transizione dei materiali tecnologici. L'abbandono dei combustibili fossili richiede infatti nuove filiere industriali basate su materiali critici come litio e cobalto, indispensabili per realizzare tecnologie a basso impatto ambientale, tra cui le batterie agli ioni di litio (LIBs). A differenza dei materiali impiegati nell'era fossile (carbone, petrolio, gas), i nuovi materiali per la transizione sono per lo più concentrati in aree geografiche limitate, a volte anche già sottoposte ad alto stress ambientale e soggette a tensioni geopolitiche, rendendo urgente lo sviluppo di strategie alternative come il recupero da rifiuti. Con la crescente domanda di materiali critici, diventa anche evidente l'impatto ambientale e sociale dell'estrazione primaria, soprattutto in Paesi come la Repubblica Democratica del Congo (da cui proviene il 70% del cobalto mondiale), dove le condizioni di lavoro nelle miniere sollevano gravi questioni etiche. Inoltre, la dipendenza europea da queste risorse pone nuove sfide strategiche, simili a quelle affrontate in passato con i combustibili fossili.

In ambito di LIBs, i catodi più diffusi includono  $\text{LiCoO}_2$  (LCO),  $\text{LiNiO}_2$  (LNO),  $\text{LiMnO}_2$  (LMO) e le miscele NMC (nickel-manganese-cobalto), mentre l'anodo è in genere costituito da grafite e l'elettrolita da sali di litio [1].

Le batterie esauste rappresentano un rischio ambientale e sanitario se smaltite in maniera non opportuna, per via della presenza di materiali pericolosi per l'ambiente (metalli, elettroliti, plastiche, etc.), ma anche un'opportunità per l'approvvigionamento sostenibile: il recupero di tali materiali riduce l'inquinamento, genera valore economico e fornisce materie prime adatte alla sintesi di nuove batterie, migliorando la resilienza delle catene di fornitura.

Attualmente però, a livello globale, solo il 5% del litio viene riciclato, un dato ancora lontano dagli obiettivi europei: secondo la nuova Battery Regulation [2], entro il 2027 si dovrà recuperare almeno il 50% del litio e il 90% di cobalto dalle batterie immesse sul mercato, percentuali che dovranno salire rispettivamente all'80% e 95% entro il 2031.

In questo scenario, il riciclo delle batterie emerge come un'opportunità strategica per limitare le emissioni, ridurre i rifiuti tossici e risparmiare risorse preziose come materie prime, acqua ed energia. Le cosiddette *miniere urbane*, ovvero il recupero di materiali critici da prodotti a fine vita, diventano una risorsa fondamentale. Il recupero dei metalli dalla "black mass", la polvere ottenuta dal pretrattamento delle batterie esauste, può attualmente avvenire attraverso due metodi principali:

- Pirometallurgia: un processo ad alte temperature che recupera metalli come cobalto, nickel e rame sotto forma di leghe. Tuttavia, questo è un processo molto energivoro,

che emette gas nocivi e non recupera in genere litio e manganese, che rimangono nelle scorie [3].

- Idrometallurgia: un processo chimico a bassa temperatura che utilizza soluzioni acquose di acidi forti (come acido cloridrico, solforico o nitrico) e agenti riducenti (ad esempio perossido di idrogeno) per dissolvere i metalli. I metalli vengono poi purificati e precipitati sotto forma di sali, pronti per essere riutilizzati in nuove batterie. Tuttavia, questa tecnica produce grandi quantità di reflui liquidi che necessitano di gestione [1].

Recentemente presso l'Università degli Studi di Brescia e in collaborazione con INSTM è stata proposta una nuova tecnologia (brevettata) che ha l'ambizione di sostituire i classici metodi pirometallurgici [4] [5] [6]. Essa si basa sull'utilizzo di microonde per facilitare il processo di riduzione carbotermica, rendendo il recupero di materiali strategici, come litio e cobalto, più efficiente ed ecologicamente sostenibile rispetto ai metodi tradizionali.

Questa tecnologia si applica direttamente alla black mass. Essa è stata concepita per sfruttare la capacità di alcuni materiali di assorbire le microonde, che generano un riscaldamento diretto e generalmente uniforme al suo interno. Le microonde agiscono riscaldando selettivamente alcuni componenti a base di carbonio. Esse possono promuovere un movimento rapido delle cariche elettriche e dei dipoli presenti all'interno del materiale. Questo riscaldamento è più veloce ed efficiente rispetto ai metodi di riscaldamento tradizionali, poiché si sviluppa direttamente dall'interno del materiale senza necessità di trasferire calore dall'esterno verso l'interno.

La tecnologia opera in aria, evitando la necessità di atmosfere inerti come l'argon, spesso utilizzato per prevenire l'ossidazione indesiderata durante i processi ad alta temperatura. Questo rende il processo più semplice da gestire e riduce ulteriormente i costi operativi. Dopo il trattamento a microonde, il litio può essere recuperato attraverso la lisciviazione in acqua, un processo relativamente sicuro ed ecologico. Invece gli altri metalli possono essere recuperati attraverso lisciviazione successiva in acidi deboli (alcuni dei quali potrebbero essere ottenuti da scarti di frutta). Questa tecnologia offre un'alternativa più sostenibile rispetto all'uso di solventi chimici aggressivi che si utilizzano nei processi idrometallurgici. È possibile infatti ottenere metalli come il litio sotto forma di sali, che possono essere successivamente riutilizzati per la produzione di nuove batterie. Questo sistema riduce notevolmente la produzione di rifiuti tossici e la necessità di smaltimento, contribuendo alla riduzione complessiva dell'impatto ambientale dell'intera catena di vita.

In termini di prestazioni, il processo a microonde è altamente efficiente, con un recupero di oltre l'85% del litio in tempi molto rapidi (circa 5-10 minuti), riducendo così drasticamente i tempi di trattamento rispetto ai metodi tradizionali e facilitando un approccio di economia circolare. Uno dei vantaggi principali di questa tecnologia è la capacità di trattare tutte le tipologie di catodo, anche in forma mista. Inoltre, non è necessario separare l'anodo prima del trattamento, in quanto la grafite è utile per le reazioni carbotermiche. Questo rende più semplici anche le fasi di raccolta, cernita e pretrattamento delle LIBs.

Questa tecnologia risulta quindi una promettente opportunità non solo perché riduce la necessità di estrazione primaria, ma anche perché potrebbe fornire, tramite riciclo, materiali compatibili con le esigenze delle future generazioni di batterie, contribuendo alla sovranità tecnologica ed ecologica dell'Europa in ambito energetico. Il MUR ha recentemente finanziato un progetto FISA (<https://caramel.unibs.it/>) per lo sviluppo di un prototipo.

La metodologia di recupero è stata inclusa nel rapporto 2025 "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" di AIRI (Associazione Italiana per la Ricerca Industriale) dal titolo AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE [7].

## Referenze:

- [1] Batteries 2024, 10(1), 38; <https://doi.org/10.3390/batteries10010038>
- [2] EU Battery Regulation 2023/1542 <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>
- [3] Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 2024, 46, 100881, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100881>
- [4] Energy Storage Materials, 2024, 72, 103703, <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103703>
- [5] Resour., Conserv. Recycl., 2023, 194, 106989, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106989>
- [6] RSC Sustainability, 2024, 2, 2505, <https://doi.org/10.1039/D4SU00202D>
- [7] <https://www.airi.it/download/ambiente-ed-economia-circolare-pubblicato-il-volume-airi-delle-innovazioni-del-prossimo-futuro/>

## **Materiali critici strategici nella economia dell'idrogeno: come possiamo ridurli?**

Simona BARISON (CNR, ICMATE)

L'idrogeno rappresenta un tassello importante della transizione energetica verso un sistema decarbonizzato e oggi si vedono numerosi investimenti in questo settore in rapida crescita. Ad oggi, rappresenta circa il 2% del mercato energetico globale e l'idrogeno verde punta a svolgere un ruolo importante nello stoccaggio di energie rinnovabili o nell'elettrificazione in settori difficili da elettrificare.

Tuttavia, l'evoluzione dell'economia dell'idrogeno richiede una valutazione approfondita delle tecnologie e dei materiali fondamentali per la sua produzione, stoccaggio, trasporto e utilizzo. Le materie prime critiche (CRM) e strategiche risultano ad oggi fondamentali per l'avanzamento di tecnologie come celle a combustibile, elettrolizzatori e meccanismi di separazione dell'idrogeno.

Questo intervento vuole fare il punto sull'impiego di materie prime critiche strategiche in varie tecnologie connesse con l'idrogeno. In particolare, si focalizzerà sul loro impiego in membrane a base metallica per la separazione di idrogeno e in rivestimenti barriera all'idrogeno, di particolare interesse nell'ottica di trasporto di idrogeno puro o in miscela in tubature. Verranno quindi illustrati i materiali allo stato dell'arte e alcuni risultati di ricerche svolti presso ICMATE per sostituire parzialmente o totalmente i CRM nella produzione di queste tecnologie, grazie anche all'impiego di tecniche magnetron sputtering per la deposizione di film.

## **POSTERS**

### **Recupero sostenibile di rame (Cu) da scarti industriali**

Pietro OSTELLARI (Università di Padova)

Pietro Ostellari, 1 Martina Tapparelli, 1 Giulia Bragaggia, 1 Annalisa Sandon, 2 Maria Cristina Lavagnolo, 2 Leonardo Girardi, 3 Michele Manica, 3 Luigi Salmaso, 4 Silvia Grossi, 5

1 Dipartimento di Scienze Chimiche, Università degli Studi di Padova

2 Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova

3 Manica S.p.A, Rovereto (TN)

4 Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, Università degli Studi di Padova

5 Institute for Chemical Technology and Polymer Chemistry (ITCP) – Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany

Il rame è una materia prima strategica, fondamentale per numerosi settori industriali e tecnologici. Tuttavia, la sua produzione è ancora fortemente dipendente da fonti primarie, con conseguenti impatti ambientali, elevati consumi energetici e un crescente rischio di approvvigionamento, legato sia alla distribuzione geografica delle risorse sia all'instabilità

dei mercati internazionali. In questo contesto, il recupero del rame da rifiuti rappresenta una via sostenibile per aumentare la circolarità delle risorse e rafforzare l'autonomia strategica del sistema produttivo.

Nel nostro lavoro è stato studiato un processo chimico sostenibile per la lisciviazione selettiva del rame da miscele di ossidi metallici, tipicamente ritrovati in scarti industriali. La selezione dei possibili leganti è stata condotta sulla base della tipologia di complessi formati con Cu(II) e della loro speciazione in funzione del pH, analizzata mediante spettroscopia UV-Vis e Raman. Sono stati presi in considerazione diversi acidi idrossi-carbossilici e amminoacidi di origine biologica, valutandone l'efficacia e la compatibilità con un processo chimico verde.

Le condizioni operative per la lisciviazione del rame sono state ottimizzate mediante un approccio di *Design of Experiment* (DoE), mentre il recupero del metallo dalla soluzione è stato tentato tramite precipitazione dell'idrossido a pH 12, per aggiunta di idrossido di sodio. Tuttavia, questa via non si è dimostrata sufficientemente selettiva, portando alla precipitazione simultanea di altri metalli.

Ciononostante, il processo risulta promettente in termini di efficienza e sostenibilità, e rappresenta un primo passo verso l'implementazione di strategie chimiche verdi per il recupero di metalli strategici, in particolare del rame, da rifiuti industriali.

### **SEArcularMINE. Un approccio circolare per il recupero di minerali e materie prime dalle salamoie marine**

Andrea CIPOLLINA (Università di Palermo)

Innovativi processi di cristallizzazione reattiva e con elettromembrane hanno permesso di recuperare materie prime critiche dalla salamoia d'acqua marina mediante l'adozione di un approccio completamente circolare e sostenibile.



Il Mar Mediterraneo è ricco di minerali preziosi, generalmente presenti in concentrazioni molto basse. Le civiltà antiche avevano trovato il modo di estrarre una parte di questa ricchezza affidandosi all'evaporazione naturale dell'acqua marina e alla cristallizzazione in bacini poco profondi per produrre sale, un processo tuttora ampiamente utilizzato dalle

saline. Oltre al cloruro di sodio e ai sali di calcio prodotti dall'acqua di mare, resta una soluzione altamente concentrata ricca di magnesio, litio e altre materie prime critiche (CRMs), nota come bittern. Questo processo di concentrazione naturale trasforma le CRMs in elementi facilmente accessibili tramite l'attuazione di processi sostenibili. Il progetto [SEArcularMINE](#), finanziato dall'UE, ha dimostrato questo potenziale in un impianto pilota pienamente operativo. Sulla base dell'analisi del contenuto del bittern, del suo valore di mercato e della ricerca relativa alle tecnologie da impiegare, il progetto SEArcularMINE si è concentrato sul recupero di magnesio, litio, boro, rubidio, bromo e sali di sodio solfato e di cloruro di sodio.

## **Economia circolare e processi basati sulle energie rinnovabili**

L'approccio pionieristico applicato da SEArcularMINE si basa su processi completamente circolari, a basse emissioni di carbonio ed economici. Come spiega Andrea Cipollina, coordinatore del progetto e ricercatore presso [l'Università di Palermo](#): «Il bittern, soluzione attualmente scaricata dalle saline, è l'unico materiale iniziale che utilizziamo, oltre all'acqua. Si tratta di un concetto rivoluzionario: i minerali che recuperiamo provengono solitamente da risorse estratte in condizioni dannose per l'ambiente e/o da processi che richiedono reagenti chimici.»

L'elettricità è il terzo e ultimo elemento iniziale, che risulta necessario per azionare i processi di separazione. SEArcularMINE ha sfruttato i processi a elettromembrana, promettenti alternative ecologiche ai metodi di separazione convenzionali, che impiegano un gradiente di potenziale elettrico come forza motrice del trasporto degli ioni e membrane a scambio ionico per la separazione e la rimozione dei componenti carichi dalle soluzioni. I processi a elettromembrana sono caratterizzati da un'elevata intensità energetica. I nostri impianti possono operare utilizzando fonti sostenibili per produrre elettricità in loco grazie al loro funzionamento flessibile a carico intermittente e variabile, adattandosi all'energia disponibile. Ciò a cui puntiamo è l'indipendenza dalla rete elettrica ricorrendo all'elettricità prodotta dal gradiente di salinità, nonché all'energia solare e a quella eolica.

## **Costruire il futuro digitale dell'Europa preservando metodi antichi**

Grazie all'azione sinergica di ricercatori dedicati dotati di varie competenze specifiche, SEArcularMINE ha sviluppato rapidamente le tecnologie: in quattro anni, il consorzio è passato dal concepimento dell'idea iniziale alla realizzazione di un impianto pilota pienamente operativo. Situata nella sede operativa di ResourSEAs, spin-off dell'Università di Palermo e partner del progetto, la struttura si trova in prossimità delle famose saline di Trapani, luogo da dove provengono le bittern. Oggi le saline fanno parte di una riserva naturale gestita dal World Wildlife Fund. La produzione delocalizzata di minerali da salamoie nel bacino del Mediterraneo attraverso l'implementazione di una tecnologia completamente circolare e autosufficiente dal punto di vista energetico porterà enormi benefici alla popolazione, all'economia e alla crescita sostenibile del Mediterraneo, il che si rivela particolarmente importante se si considera che la maggior parte dei soggetti interessati (presenti nelle zone dove si trovano le saline, ovvero nell'Europa meridionale e nel Nord Africa) hanno spesso bisogno di un motore che promuova la crescita economica. Le conoscenze acquisite grazie al successo delle sfide ingegneristiche e all'esperienza operativa sono state enormi. L'impianto pilota ha dimostrato con successo la fattibilità tecnica delle tecnologie, producendo fino a 100 chilogrammi di idrossido di magnesio al giorno. Da questo lavoro sono nate inoltre idee per il recupero del litio dalle batterie usate e sono stati presentati diversi brevetti, tra cui uno per un processo di dissalazione circolare; per di più, lo sviluppo delle competenze e lo scambio di oltre 80 ricercatori all'inizio della propria carriera ha creato una rete sinergica di professionisti intesa a

continuare questo lavoro. ResourSEAs sta ora istituendo partenariati con saline di tutto il Mediterraneo al fine di progettare i primi impianti su larga scala che producono minerali in Europa, per l'Europa. L'acqua di mare è destinata a diventare la soluzione sostenibile per l'«estrazione» di materie Prime Critiche in questo continente.

### **Valorizzazione di Batterie agli ioni di litio esauste per la preparazione di materiali per la catalisi**

Emilia PAONE (Università di Reggio Calabria)

La crescente diffusione delle batterie agli ioni di litio (LIBs), fondamentali per la transizione energetica, pone importanti sfide legate alla gestione del fine vita e alla dipendenza da materie prime critiche come litio, cobalto e nichel. In questo contributo si propone un approccio innovativo e sostenibile per il riutilizzo diretto dei metalli contenuti nelle batterie esauste, trasformandoli in catalizzatori eterogenei attivi per applicazioni chimiche. Mediante semplici trattamenti termici, è possibile ottenere materiali catalitici a partire dalla cosiddetta *black mass*, evitando processi complessi di separazione e purificazione dei metalli. I catalizzatori così ottenuti mostrano buone prestazioni nella trasformazione di composti derivati dalla biomassa, aprendo nuove prospettive per un recupero ad alto valore aggiunto delle batterie. Il lavoro si inserisce pienamente in un'ottica di economia circolare, contribuendo alla riduzione della dipendenza da risorse strategiche e promuovendo processi chimici sostenibili per l'energia e l'industria.

### **Batterie al sodio come alternativa all'impiego di litio**

Elisa MERCADELLI (ISSMC-CNR Faenza)

With the growing global energy demand and the increasing integration of renewable energy sources, the rapid development of efficient and robust energy storage technologies is essential to ensure system reliability. In this context, sodium solid-state batteries (SSSBs) emerge as a promising alternative to conventional lithium-based systems and those using organic liquid electrolytes. This is due to the abundance and cost-effectiveness of sodium resources, combined with the inherent safety and high energy density offered by solid electrolytes. Despite the notable progress in solid-state electrolytes, particularly in terms of enhanced ionic conductivity and other key properties, their practical implementation in cells still faces several critical challenges that remain to be addressed. Among the others, NASICON (Na superionic conductors) compounds are among the most promising oxide ceramic electrolytes for the new generation of rechargeable battery technology. The processing issues, anisotropic thermal expansion, impurity phase formation, and large interfacial impedance are still challenges of NASICON-type electrolytes to be thoroughly investigated. In this work, the entire ceramic process, from powder synthesis to shaping and sintering, was thoroughly optimized to produce reliable NASICON-type electrolytes with thicknesses below 1 mm.

### **Polimeri metalloorganici come candidati sostenibili nei generatori termoelettrici**

Simone GALLIANO (Università di Torino)

Oggiorno, quasi il 70% di tutta l'energia consumata viene dispersa nell'ambiente sotto forma di calore a bassa temperatura (<200 °C) e non sfruttata. Riuscire a recuperare e utilizzare efficacemente questo calore permetterebbe di ridurre drasticamente il consumo energetico, l'utilizzo di combustibili fossili e il loro impatto ambientale.[1] Una possibilità

è l'impiego di materiali e generatori termoelettrici che consentono la conversione diretta del calore in elettricità tramite l'effetto Seebeck. Attualmente, la maggior parte dei materiali termoelettrici è di natura inorganica (es.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$ ), ma questi generalmente presentano basse efficienze, scarsità di materie prime, processi di fabbricazione costosi e ad alta temperatura, fragilità strutturale e tossicità. Per superare queste criticità, appare necessario sviluppare nuovi materiali più performanti, sostenibili e sicuri.[2] Recentemente, i polimeri di coordinazione sono emersi come promettenti materiali termoelettrici per il recupero del calore a bassa temperatura.[3] Questi polimeri possono essere facilmente modificati sostituendo il centro metallico o i leganti organici, risultando estremamente versatili e adattabili a un'ampia gamma di requisiti applicativi e condizioni operative.

Nel presente lavoro di ricerca, differenti polimeri metallo-organici a base di nichel e rame sono stati sviluppati attraverso processi sintetici semplici e scalabili, e opportunamente caratterizzati. Sebbene insolubili, i polimeri sono stati efficacemente processati da soluzione e depositati su diversi substrati in forma di film sottile, senza necessità di additivi ed elevate temperature, per la realizzazione di dispositivi termoelettrici planari e flessibili, dimostrandone la piena funzionalità.

Questi risultati suggeriscono che i polimeri metallo-organici possono aprire nuove prospettive nel recupero di calore a bassa temperatura, grazie alla loro combinazione di efficienza, stabilità e adattabilità a sistemi e geometrie non convenzionali.

### **Bibliografia**

- [1] Yuan F., et al., *Small*, 17, 2100505 (2021)
- [2] Artini C., et al., *Nanotechnology*, 34, 292001 (2023)
- [3] Yuanhui S., et al., *Advanced Materials*. 28, 3351 (2016)

### **Materiali biogenici sostenibili per l'illuminazione a stato solido**

Stefano NEJROTTI (ISSMC-CNR Faenza)

L'illuminazione a stato solido, tramite la tecnologia WLED (*White-Light Emitting Diodes*), è di fondamentale importanza per la transizione energetica, grazie a caratteristiche come l'elevata efficienza energetica, la stabilità e la sicurezza. Se dal punto di vista energetico i sistemi di illuminazione WLED sono superiori alle tradizionali lampadine a incandescenza e fluorescenza, la loro produzione pone però dei problemi di sostenibilità, a causa dell'uso di terre rare (principalmente ittrio e cerio) nell'emettitore fluorescente, il componente che converte parte della luce blu prodotta dal LED in luce gialla, ottenendo la luce bianca desiderata. Per superare la dipendenza da queste materie prime critiche, una possibile soluzione è rappresentata dallo sviluppo di emettitori a base di proteine fluorescenti, nelle quali un fluoroforo organico è ospitato all'interno di una struttura proteica.[1,2] Con lo scopo di ottenere proteine fluorescenti che presentino i necessari requisiti in termini di proprietà ottiche e fotostabilità, il presente contributo propone una famiglia di molecole fluorescenti, basate sulla struttura del benzotiadiazolo decorato con due anelli tiofenici,[3] come fluorofori non naturali, stabili e modulabili in termini di lunghezza d'onda di assorbimento ed emissione. Attraverso modifiche sintetiche, la struttura base del fluoroforo è stata adattata per favorire l'interazione con la proteina ospitante, ottenendo materiali biogenici che hanno dimostrato risultati promettenti, in termini di qualità del colore prodotto e di stabilità, quando testati come emettitori in un dispositivo WLED.

## Bibliografia

- [1] V. Fernández-Luna, P. B. Coto, R. D. Costa, Angew. Chem. Int. Ed. **2018**, 57, 8826 – 8836
- [2] S. Ferrara, S. H. Mejias, M. Liutkus, G. Renno, F. Stella, I. Kociolek, J. P. Fuenzalida-Werner, C. Barolo, P. B. Coto, A. L. Cortajarena, R. D. Costa, Adv. Funct. Mater. **2022**, 32, 2111381
- [3] B. A. D. Neto, J. R. Correa, J. Spencer, Chem. Eur. J. **2022**, 28, e202103262

## Sostituzione e/o minimizzazione di elementi critici in catalisi

Gaia CASTELLANI (Università di Trieste)

Michele Melchionna, Paolo Fornasiero

La transizione energetica richiede lo sviluppo di tecnologie sostenibili e scalabili per la produzione e l'utilizzo di energia pulita. In questo contesto, i catalizzatori rappresentano elementi fondamentali, ma molti di quelli attualmente in uso si basano su materiali critici (CRM) come platino, palladio, rodio e rutenio, caratterizzati da scarsa disponibilità, elevato costo e forte dipendenza geopolitica. Il concetto di dematerializzazione prevede la riduzione della quantità complessiva di materiale utilizzato in un processo catalitico, in linea con i principi dell'economia atomica. La sostituzione dei CRM con elementi più abbondanti costituisce un primo passo, ma risulta spesso insufficiente senza una contestuale ottimizzazione funzionale del materiale. L'ingegnerizzazione della funzionalità in relazione alla specifica reazione catalitica consente di aumentare l'attività intrinseca del catalizzatore.<sup>1</sup>

Un esempio efficace è rappresentato dai catalizzatori gerarchici, in cui l'organizzazione strutturale multiscala può favorire la selettività e la stabilità anche in condizioni operative complesse. Strutture *core-shell* che combinano nanoparticelle di metalli nobili con ossidi metallici porosi sono state dimostrate efficaci nel prolungare la vita utile del catalizzatore, prevenendo la sinterizzazione a elevate temperature.<sup>2</sup>

Un approccio particolarmente promettente per massimizzare l'efficienza atomica è l'impiego dei *single atom catalysts* (SACs), in cui ogni atomo metallico può potenzialmente partecipare all'attività catalitica. L'isolamento dei siti attivi metallici modifica in modo significativo i meccanismi di reazione, favorendo percorsi selettivi grazie a modalità di coordinazione più controllate. Questo approccio è particolarmente vantaggioso per i metalli preziosi, ampliandone la sostenibilità d'impiego.<sup>3</sup>

Un'ulteriore strategia innovativa è rappresentata dai sistemi fotocatalitici semi-eterogenei, basati sull'interazione tra metalli di transizione e un semiconduttore. La variazione morfologica del supporto può portare alla generazione controllata di difetti strutturali, consentendo l'introduzione di unità in grado di coordinare selettivamente le specie metalliche, migliorando l'efficienza della fotocatalisi. Questo approccio apre nuove prospettive per la progettazione razionale di catalizzatori avanzati per la sintesi organica sostenibile e lo sviluppo farmaceutico.<sup>4</sup>

## Riferimenti

- [1] *ChemSusChem* 2025, 18, e202402064
- [2] *Science*, 2012, 337
- [3] *J. Am. Chem. Soc.* 2025, 147, 2275–2290
- [4] *Adv. Sci.* 2023, 10, 2303781

## **Impurità e loro impatto sui catodi NMC811 (Ni80Mn10Co10) riciclati**

Micol DI VEROLI (Sapienza Università di Roma)

M. Di Veroli<sup>1\*</sup>, P.G. Schiavi<sup>2</sup>, P. Altimari<sup>2</sup>, F. Scaramuzzo<sup>1</sup>, Y. Shao-Horn<sup>3</sup>, M. Pasquali<sup>1</sup>, F. Pagnanelli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria, Sapienza Università di Roma, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Chimica, Sapienza Università di Roma, Italia

<sup>3</sup>Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Scienza dei Materiali, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

Le batterie agli ioni di litio (LIB) sono essenziali per dispositivi elettronici e veicoli elettrici, grazie alla loro elevata densità energetica, lunga durata e bassa autoscarica. Tuttavia, entro il 2030 si prevede lo smaltimento di circa 125.000 tonnellate di batterie solo in Europa, rendendo indispensabile lo sviluppo di soluzioni di riciclo efficienti, in linea con quanto richiesto dal Regolamento Europeo 1542/2023.

Questo progetto ha avuto l'obiettivo di ottimizzare il processo di riciclo delle LIB, concentrandosi sul recupero di metalli critici come cobalto, nichel e manganese presenti nella cosiddetta "black mass", ovvero il materiale derivante dal pretrattamento meccanico delle batterie esauste. Attraverso un processo idrometallurgico di lisciviazione, i metalli recuperati sono stati riutilizzati per la produzione di materiali catodici NMC811, impiegando una tecnica di co-precipitazione come ossalati, più semplice e sostenibile rispetto ai metodi tradizionali.

È stato inoltre analizzato l'effetto delle impurità di rame, provenienti dai collettori di corrente su cui è depositato il materiale catodico, sulle prestazioni elettrochimiche dei materiali riciclati. A concentrazioni elevate, tali impurità possono comprometterne la stabilità e l'efficienza, mentre entro determinate soglie possono agire da dopanti, contribuendo al miglioramento delle proprietà del materiale.

In conclusione, questo lavoro propone un approccio efficace e sostenibile per il riciclo delle batterie agli ioni di litio, favorendo la transizione verso un'economia circolare e riducendo la dipendenza dalle materie prime.

Lithium-ion batteries (LIBs) are essential for electronic devices and electric vehicles due to their high energy density, long lifespan, and low self-discharge rate. However, by 2030, approximately 125,000 tons of batteries are expected to be discarded in Europe alone, making the development of efficient recycling solutions crucial, in accordance with the requirements of European Regulation 1542/2023. This project aimed to optimize the LIB recycling process, focusing on the recovery of critical metals such as cobalt, nickel, and manganese found in the so-called "black mass" — the material obtained from the mechanical pretreatment of spent batteries. Through a hydrometallurgical leaching process, the recovered metals were reused for the production of NMC811 cathode materials, using a co-precipitation as oxalates technique, which is simpler and more sustainable than conventional methods.

The effect of copper impurities—originating from the current collectors on which the cathode material is deposited—was also analyzed in relation to the electrochemical performance of the recycled materials. At high concentrations, these impurities can compromise the stability and efficiency of the materials, while within certain thresholds, they can act as dopants and help improve the material's properties.

In conclusion, this work presents an effective and sustainable approach to lithium-ion battery recycling, supporting the transition towards a circular economy and reducing dependence on raw materials.

## **Nuovi elettro-catalizzatori senza CRM per applicazioni in elettrolisi a membrana**

Fausta GIACOBELLO (ITAE CNR Messina)

Per raggiungere una crescita sostenibile e mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici, la transizione dai combustibili fossili a fonti di energia più pulite sta diventando sempre più importante. Lo sviluppo di nuovi vettori energetici e la loro integrazione con fonti di energia rinnovabile e l'infrastruttura della rete energetica, tuttavia, presentano barriere impegnative. È ampiamente riconosciuto che la creazione di soluzioni di stoccaggio più scalabili ed efficaci è essenziale per un futuro sostenibile.[1] L'idrogeno verde, generato tramite elettrolisi, offre vantaggi significativi: alta densità energetica, migliore efficienza di trasporto e diverse applicazioni che spaziano dalla conversione di energia a numerosi processi industriali. L'elettrolisi PEM (membrana a scambio protonico) è una tecnologia particolarmente vantaggiosa per la scissione dell'acqua, ottenendo elevate densità di corrente, efficienza superiore, produzione di idrogeno di elevata purezza e risposta rapida. [2-3] L'elettrolisi PEM, nonostante i suoi numerosi vantaggi, presenta anche degli svantaggi significativi che ne limitano l'adozione su larga scala. Uno dei principali è legato ai costi. I materiali utilizzati, in particolare i catalizzatori a base di metalli nobili come il platino e l'iridio, contribuiscono in modo sostanziale al costo complessivo del sistema. La minimizzazione degli elettrocatalizzatori metallici ad alto costo è necessaria per ottenere una produzione di idrogeno verde economicamente vantaggiosa tramite questa tecnologia. Il forte aumento del costo dell'Ir e del Pt recentemente osservato richiede l'individuazione di soluzioni catalitiche alternative per la reazione di evoluzione dell'ossigeno (OER) e la reazione di evoluzione dell'idrogeno (HER) nell'elettrolisi PEM.

Lo scopo del lavoro ha riguardato la sintesi, la caratterizzazione chimico-fisica ed elettrochimica di due catalizzatori innovativi CRM-free: Ag/Tisubossidi (senza metalli del gruppo del platino (non-PGM)) per la reazione di evoluzione dell'ossigeno e MoS<sub>2</sub>/C per la reazione di evoluzione dell'idrogeno HER.

Per il catalizzatore anodico, sono stati miscelati nitrato di argento e subossidi di titanio (Ti<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub>) con polveri in fase Magneli, utilizzando una procedura di sintesi allo stato solido, e successivamente sono stati sottoposti a trattamento termico a 300°C in un flusso di gas 50% H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> per favorire l'inclusione dell'argento all'interno della struttura dei subossidi di Titanio.

Per il catalizzatore catodico, la sintesi prevede la reazione di precursori contenenti molibdeno e zolfo (es. molibdato di ammonio e tiourea) in un'autoclave ad alta temperatura (tipicamente 200 °C). L'aggiunta di un precursore di carbonio (es. Ketjenblack® EC-600JD) durante la sintesi porta alla formazione del composito MoS<sub>2</sub>/C. Il MoS<sub>2</sub> ottenuto con questo metodo presenta tipicamente una morfologia a nanofoglie o nanosfere, dispersa su una matrice di carbonio. La presenza del carbonio migliora la condutività elettrica del materiale, previene l'aggregazione delle particelle di MoS<sub>2</sub> e può aumentare la superficie specifica.

Questi catalizzatori sono stati testati singolarmente in una cella elettrochimica da 5 cm<sup>-2</sup> mediante curve di polarizzazione e analisi di spettroscopia d'impedenza a 1.8V e 2V che identificano rispettivamente la regione di attivazione del catalizzatore e la regione ohmica. Per valutare le prestazioni e la durata dei catalizzatori sono state anche effettuate delle misure cronogalvanostatiche.

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano il progetto REDHy per il suo supporto finanziario. Questo progetto ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea nell'ambito dell'accordo di sovvenzione n. 101137893.

[1] A. S. Aricò, S. Siracusano, N. Briguglio, V. Baglio, A. Di Blasi, V. Antonucci, *Journal of Applied Electrochemistry* 2013, 43, 107-118

[2] T. Freire-Barceló, F. Martín-Martínez, Á. Sánchez-Miralles, *Electric Power Systems Research* 2022, 209, 107953.

[3] A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, M. Berecibar, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2022, 159, 112213

## **Analisi tecno-economica di un processo di riciclo di pannelli fotovoltaici:**

### **impatto del recupero di silicio e argento**

Pietro ALTIMARI (Sapienza Università di Roma)

I pannelli fotovoltaici sono largamente utilizzati per generare energia elettrica dalla luce solare. Sulla base dei dati di potenza globale installata (2.2 TW nel 2024) [1] e tenuto conto che la vita media di un pannello è pari a circa 25 anni, si prevede che nei prossimi anni verrà generato un volume rapidamente crescente di pannelli a fine vita (8.8 milioni di ton entro il 2030) [2]. La sostenibilità a lungo termine del fotovoltaico dipenderà dalla capacità di recuperare e riutilizzare i materiali contenuti in tale volume. Tra le tecnologie attualmente disponibili, il silicio cristallino (Si-cristallino) copre circa il 90% della quota di mercato globale [3]. Vetro ed alluminio costituiscono rispettivamente il 70% ed il 10% del peso di tali pannelli e devono essere recuperati per soddisfare gli obiettivi stabiliti dalla normativa (85% di recupero di materia) [4]. Tuttavia, il recupero di questi materiali non assicura un bilancio economico positivo del processo di riciclo, rendendo necessaria una tariffa di smaltimento. Tale tariffa può essere ridotta estendendo il processo di riciclo al recupero di metalli (e.g. argento) che, seppur presenti nel pannello in concentrazioni molto più basse rispetto a vetro ed alluminio, presentano un valore di mercato molto più elevato.

Nel corso dell'intervento, saranno illustrati i risultati dell'analisi tecno-economica di un processo per il recupero di vetro, alluminio, argento e silicio da pannelli a fine vita. I vantaggi derivanti dall'introduzione di un trattamento idrometallurgico per il recupero di argento e silicio saranno quantificati integrando l'analisi tecno-economica con una previsione del contenuto di argento nei pannelli raccolti. Sarà quindi analizzata l'opportunità di escludere il trattamento idrometallurgico procedendo ad una vendita diretta di una frazione ricca in argento e silicio.

### **Riferimenti**

1. [Global Market Outlook for Solar Power 2025-2029.](#)
2. [IRENA and IEA-PVPS \(2016\) End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels](#)
3. [IEA Report \(2024\), TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS](#)
4. [DIRETTIVA 2012/19/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO](#)